37

DER PRAKTISCHE FUNKAMATEUR



Otto Morgenroth

Funktechnische Bauelemente

Teil II:

Spulen, Transformatoren und Halbleiterbauelemente

Der praktische Funkamateur · Band 37

Funktechnische Bauelemente II

Aufbau, Eigenschaften, Wirkungsweise, technische Daten

Otto Morgenroth

Funktechnische Bauelemente

Aufbau, Eigenschaften,
Wirkungsweise, technische Daten

Teil II:
Spulen, Transformatoren
und Halbleiterbauelemente

DMV

Deutscher Militärverlag

Redaktionsschluß: 31. Dezember 1962

INHALTSVERZEICHNIS

VORWORT

Entwurf und Konstruktion eines funktechnischen Gerätes setzen umfangreiche und genaue Kenntnisse der Bauelemente voraus, da von ihrem richtigen Einsatz die Funktion des Empfängers, Senders, Meßgerätes oder der elektronischen Schaltung in hohem Maße mitbestimmt wird. In jeder funktechnischen Schaltung befinden sich eine Vielzahl der unterschiedlichsten Bauelemente, und es ist durchaus nicht gleichgültig, ob diese oder jene Bauform beziehungsweise Type zur Anwendung kommt. Bei der Besprechung der Bauelemente sind, soweit es zweckmäßig erschien, auch Betriebsanweisungen und Prospekte unserer Bauelemente-Industrie berücksichtigt worden. Sie können vor allem für den Praktiker wertvoll sein, denn nicht ein jeder besitzt diese oft unentbehrlichen Unterlagen.

Von der Abbildung der Schaltsymbole wurde abgesehen, da diese in Heft 10 der Reihe „Der praktische Funkamateur" enthalten sind.

Das aus der Praxis geschriebene Bändchen soll dem Amateur beim Entwurf und Aufbau funktechnischer Schaltungen eine Hilfe sein und zur Erweiterung seiner Kenntnisse beitragen. Darüber hinaus wendet es sich an den im Nachrichtendienst unserer Nationalen Volksarmee tätigen Soldaten, an den Jugendlichen, der einen funktechnischen Beruf erlernen will oder sich in der Ausbildung befindet, an den Schüler des polytechnischen Unterrichts und an den an der Funktechnik interessierten Laien.

Der Verfasser dankt den Betrieben

VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder),

VEB Werk für Fernsehelektronik, Berlin-Oberschöneweide,

VEB Werk für Bauelemente der Nachrichtentechnik „Carl von Ossietzky", Teltow,

VEB Keramische Werke Hermsdorf (Thüringen),

VEB Kondensatorenwerk Gera,

VEB Gleichrichterwerk Großräschen,

VEB Funkwerk Dabendorf,

Fa. Gustav Neumann, Creuzburg (Werra),

die ihm neueste technische Unterlagen und teilweise auch Fotos überlassen haben.

Für die Herstellung von Bildvorlagen hat der

VEB Stern-Radio, Sonneberg (Thüringen)

eine größere Anzahl von Bauelementen zur Verfügung gestellt. Diesem Betrieb sowie

Herrn Cuno Triebel, Sonneberg,

der zahlreiche fotografische Aufnahmen im Fotolabor dieses Werkes anfertigte, sei gedankt.

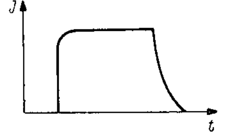
Sonneberg (Thüringen),
Bert-Brecht-Straße 18,
im November 1962 Der Verfasser

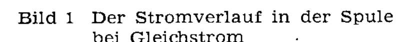
EINLEITUNG

Die in dieser Broschüre behandelten Bauelemente haben, von wenigen Ausnahmen abgesehen, große praktische Bedeutung für den Aufbau funktechnischer Geräte. Besonders wichtig ist die Darstellung der neueren Halbleiter-Bauelemente, zum Beispiel der Kristallgleichrichter und Transistoren, die in letzter Zeit ein weites Anwendungsgebiet gefunden haben.
Die Bauelemente sind nach einem einheitlichen Schema betrachtet. Der Begriffsbestimmung folgt ein allgemeiner Überblick über Grundform, Wirkungsweise und grundsätzliche Eigenschaften. Anschließend werden die speziellen Bauformen sowie die besonderen mechanischen und elektrischen Eigenschaften jeder Art, Type und Ausführung besprochen sowie Angaben über Standardisierung, Normung, Typenbezeichnung, Kennzeichnung, technische Daten, Anwendung und gegebenenfalls die Schaltungstechnik gemacht. Im Anhang sind Übersichtstafeln der in der Deutschen Demokratischen Republik gefertigten Kristallgleichrichter und Transistoren zu finden.

1. SPULEN

Die Spule ist üblicherweise eine Anordnung mehrerer voneinander isolierter Windungen *eines* Leiters auf einer gemeinsamen Achse.
Gleichstrom gegenüber verhält sich die Spule im allgemeinen wie ein Ohmscher Widerstand (Wirkwiderstand); entsprechend dem Widerstand der Drahtwicklung fließt bei einer gegebenen Spannung ein bestimmter Strom durch die Spule.
Im Gegensatz zum Ohmschen Widerstand ist die Stromstärke vom Zeitpunkt der Messung abhängig. Es zeigt sich, daß nach dem Einschalten der Gleichspannung der Strom nicht plötzlich, sondern langsam den dem Gleichstromwiderstand der Spule entsprechenden Stromwert erreicht und daß nach dem Abschalten der Spannung noch kurzzeitig Strom fließt (Bild 1).
Um diese Erscheinung zu erklären, ist von der Tatsache auszugehen, daß sich um jeden stromdurchflossenen Leiter ein Magnetfeld bildet (Bild 2). Wenn sich dessen Kraftliniendichte ändert — diese Änderung geschieht im vorliegenden Falle bei wechselweiser rascher Zu- oder Abschaltung der Spannung —, wird in den eigenen Windungen der felderzeugenden Spule eine Spannung induziert*). Sobald der Strom die erste Windung der Spule durchflossen hat, baut sich um diese Windung ein magnetisches Feld auf. Dessen Kraftlinien schnei-




Bild 1 Der Stromverlauf in der Spule bei Gleichstrom

* Von „inducere“ (lat.) = „hineinführen“ abgeleitet.

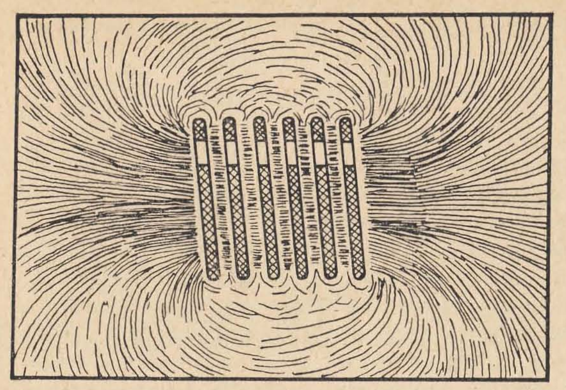


Bild 2 Das magnetische Kraftlinienfeld einer vom Strom durchflossenen Spule

den die anderen Spulenwindungen und induzieren in diesen eine der erzeugten Spannung entgegenwirkende Spannung. Diese bewirkt, daß der Strom nicht sofort seinen Höchstwert erreicht, sondern daß sich sein größter Wert erst nach Einschwingen des Magnetfeldes auf eine konstante Größe einstellt. Im Augenblick des Ausschaltens des Stromes bricht auch das Magnetfeld der Spule zusammen, und die Änderung der Kraftliniendichte induziert wiederum eine Spannung in den Spulenwindungen. Da diese das Bestreben hat, den alten Zustand aufrechtzuerhalten, findet noch kurzzeitig ein Stromfluß statt. Wird durch rasches Ein- und Ausschalten der Spannung das Magnetfeld wechselnd auf- und abgebaut, dann kann der Strom seinen Höchstwert nicht mehr erreichen.
Außer dem Gleichstromwiderstand der Wicklung setzt die Spule dem „zerhackten Gleichstrom" einen weiteren Widerstand entgegen, nämlich einen frequenzabhängigen Wechselstromwiderstand; man bezeichnet ihn als induktiven Widerstand (induktiven Blindwiderstand), Symbol R_L, und mißt ihn wie den Ohmschen Widerstand in Ohm. Das Zeichen R_L

wird in Formeln und zur Kurzbezeichnung des induktiven Widerstandes bei Berechnungen verwendet.
Die vom Aufbau, der Windungszahl, der Länge und dem Durchmesser einer Spule abhängige charakteristische Größe ist die Selbstinduktion oder Induktivität, Symbol L. Nach ihr werden Spulen gemeinhin auch als Induktivitäten bezeichnet.

Die Induktivität ist um so stärker, je größer die Windungszahl und der Durchmesser der Spule sind und je kürzer sie ist; die Induktivität vergrößert sich weiter, wenn die Spule einen Eisenkern (Massekern) enthält.

Unter der Voraussetzung, daß das magnetische Feld alle Windungen erfaßt, was bei dicht beieinanderliegenden Windungen der Fall ist, steigt die Induktivität mit dem Quadrat der Windungszahl.
Sind 2 Spulen räumlich so angeordnet, daß das Magnetfeld der einen Spule (Primärspule) auch die Windungen der anderen (Sekundärspule) beeinflußt, so findet eine Energieübertragung durch Induktion statt. Das Magnetfeld des ersten Leiters durchsetzt die Windungen des zweiten und umgekehrt das des zweiten Leiters die Windungen des ersten. Ändert sich in einem Leiter die Stromstärke, so ändert sich das magnetische Feld, und im anderen Leiter wird eine Spannung induziert. Für den Betrag der induzierten Spannung ist die gegenseitige Induktivität oder Gegeninduktivität maßgebend, diese hängt von der Form und der Entfernung der Leiter sowie von der Permeabilität*)

* Als Permeabilität wird die magnetische Durchlässigkeit eines Stoffes bezeichnet. Sie gibt an, wievielmal mehr Kraftlinien in einem magnetischen Feld durch einen cm² des Stoffes gehen als durch Luft oder, mit anderen Worten, wievielmal sich die magnetische Feldstärke vergrößert oder verkleinert, wenn man einen Stoff in das betreffende Magnetfeld bringt. Für den materiefreien Raum (Vakuum, Luft) ist die Permeabilität $\mu = 1$. Alle Stoffe mit der Permeabilität > 1 heißen paramagnetisch, solche mit μ-Werten < 1 diamagnetisch.

des Mediums innerhalb der Wicklungen ab. Bei nahe benachbarten oder aufeinandergewickelten Spulen ist die Gegeninduktivität besonders groß. Anstelle der Gegeninduktivität benutzt man häufig den Kopplungsfaktor (auch Kopplungskoeffizient), der eine Funktion der Gegeninduktivität ist. Je nach ihrer Größe ist zwischen fester und loser K o p p l u n g zu unterscheiden.

Wird ein Wechselstrom durch eine Spule geleitet, dann ändert sich das Magnetfeld im Rhythmus der Frequenz des Stromes. Der wechselnde Auf- und Abbau des Magnetfeldes beeinflußt im gleichen Rhythmus — während jeder Halbwelle — Induktionsspannung und Stromdurchgang (Bild 3).

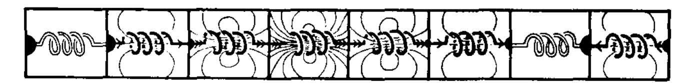


Bild 3 Spannung, Strom und Magnetfeld in einer Spule. Die Höhe der Spannung wird durch die Dicke des Punktes am Spulenende, die Stromstärke durch die Zahl der Pfeile, die Stärke des Magnetfeldes durch die Zahl der Feldlinien angezeigt. Im ersten Bild ist die Spannung im Augenblick des Höchstwertes an die Spule gelegt worden. Strom fließt noch nicht, ein Magnetfeld fehlt. Im zweiten Bild beginnen Strom und Magnetfeld in Schwung zu kommen, während die Spannung bereits abgenommen hat. In dieser Art geht es weiter, bis (im Bild 4) Strom und Magnetfeld ihren Höchstwert erreicht haben, während die Spannung Null geworden ist. Im 5. Bild beginnt die Spannung entgegengesetzt zu wirken, wodurch Strom und Magnetfeld wieder zu sinken beginnen. Im vorletzten Bild hat die Spannung ihren entgegengesetzten Höchstwert erreicht. Strom und Magnetfeld fehlen, um im nächsten Augenblick (letztes Bild) in entgegengesetzter Richtung in Schwung zu kommen (nach F. Bergtold)

II Je größer die Frequenz ist, desto größer sind der induktive Widerstand und die Schwächung des Wechselstroms.

Der induktive Widerstand R_L (siehe oben) ist von der Induktivität L der Spule und der Frequenz f des Stromes, der durch die Spule fließt, abhängig:

$$R_L = \omega L;$$

($\omega = 2\pi f$ = Kreisfrequenz, L = Induktivität der Spule).



Der induktive Widerstand nimmt mit größerer Induktivität der Spule und höherer Frequenz zu. Spulen mit Eisenkern (Massekern) besitzen einen größeren induktiven Widerstand als Luftspulen.

Der induktive Widerstand R_L einer Spule mit der Induktivität L ist bei der Kreisfrequenz ω beziehungsweise der Frequenz f:

$$R_L = \omega L = 2\pi f \cdot L = 6{,}28 \cdot f \cdot L;$$

(R_L in Ω, L in H).

$$R_L\,[\Omega] = \frac{2\pi f \cdot L}{10^3} = \frac{6{,}28\, f \cdot L}{10^3},$$

(L in mH);

$$R_L\,[\Omega] = \frac{2\pi f \cdot L}{10^6} = \frac{6{,}28\, f \cdot L}{10^6},$$

(L in μH).

(Die Größen H, mH und μH sind am Ende des Abschnittes erläutert.)

Aus dem eingangs Gesagten geht hervor, daß bei einem induktiven Verbraucher der Strom den Höchstwert später erreicht als die Spannung: Der Strom eilt der **Spannung nach.** Diese zeitliche Verschiebung wird als Phasenverschiebung bezeichnet und durch den Winkel φ dargestellt. In der Praxis ist jedoch dieser Phasenwinkel infolge der auftretenden Verluste, die durch den Verlustwiderstand R_V ausgedrückt werden, um den Verlustwinkel δ kleiner; also gilt: $\varphi = 90° - \delta$. Es ist üblich, den Tangens des Verlustwinkels anzugeben, und zwar als Verlustfaktor tan δ. Diese Größe ist das Verhältnis des Verlustwiderstands zum induktiven Widerstand (bei Reihenschaltung), also

$$\tan \delta = \frac{R_v}{\omega L};$$

(R_V = Verlustwiderstand, ωL = Wechselstromwiderstand der Selbstinduktion — Blindwiderstand —).

Der reziproke Wert des Verlustfaktors ist die Güte ϱ, auch als Gütefaktor bezeichnet. Für ϱ findet man häufig das Symbol Q (aus dem englischen „quality" abgeleitet).

Übliche Werte für ϱ: 60 bis 400, entsprechend einem $\tan \delta$ von 0,25 bis 1,5 Prozent.

Spulenverluste, die durch einen Reihen- oder Parallelwiderstand (R_r oder R_p) dargestellt werden können, äußern sich in der Verkleinerung des Phasenwinkels und in einer Erwärmung.

In der Hauptsache werden Verluste durch den Ohmschen Widerstand des Drahtes hervorgerufen. Da der Skin-Effekt, der eine Verdrängung des Stromflusses nach den äußeren Leiterschichten hin bewirkt — jedenfalls bei hohen Frequenzen und geringer Drahtstärke —, hierbei eine Rolle spielen kann, wird der Widerstand verhältnismäßig groß. Diese Verluste sind die sogenannten Kupferverluste. (Der Skin-Effekt kann nur indirekt zu den Kupferverlusten gerechnet werden.)

Weiter kommen die Verluste im Dielektrikum in Betracht. Diese dielektrischen Verluste, die selbst bei relativ hohen Isolationswiderständen vorhanden sind, hängen von der Frequenz ab; sie nehmen mit steigender Frequenz zu.

Ein meist unerwünschter Verlust ist die besonders im Bereich der hohen Frequenzen störende Kapazität, die sowohl zwischen den einzelnen Windungen als auch — bei mehrlagigen Spulen — zwischen den Wicklungslagen auftritt. Die einzelnen Kapazitäten zwischen den Windungen und Wicklungslagen können durch eine einzige Kapazität zwischen den Spulenenden dargestellt werden. Sie ist dann die Eigenkapazität der Spule, und mit ihr bildet die Spule einen Parallel-

resonanzkreis, dessen Resonanzfrequenz die Eigenfrequenz der Spule ist.

Kernspulen und metallisch abgeschirmte Spulen zeigen zusätzlich Wirbelstromverluste*).

Wie die Kapazität des Kondensators ist auch die Induktivität der Spule temperaturabhängig. Das Maß der Induktivitätsänderung in Abhängigkeit von der Temperatur ist der Temperaturkoeffizient TK. Er drückt die relative Induktivitätsänderung $\Delta L/L$ je °C aus. Der TK wird sowohl durch die Leitfähigkeit des Drahtes als auch durch die Ausdehnung der Spule bestimmt. Eine Zunahme der Spulenlänge vermindert, etwa linear, die Induktivität, eine Zunahme des Spulendurchmessers erhöht sie, etwa quadratisch. Bei Vorhandensein eines Eisenkerns erfolgt eine Beeinflussung des TK-Wertes durch die Temperaturabhängigkeit der Permeabilität des Kernes.

Die Maßeinheit der Induktivität ist das Henry (H).

In der Radiotechnik sind vorwiegend kleinere Werte gebräuchlich;

1 H = 1000 mH oder 10^3 mH = 1 000 000 μH oder 10^6 μH
1 mH = 0,001 H oder 10^{-3} H = 1000 μH oder 10^3 μH
1 μH = 0,000001 H oder 10^{-6} H = 0,001 mH oder 10^{-3} mH

Die kleine Einheit cm ist nicht mehr üblich, wird aber gelegentlich heute noch als Nanohenry (nH) gebraucht;

1 nH = 0,001 μH oder 10^{-3} μH = 1 cm
1 μH = 1000 nH (oder cm) = 10^3 nH (oder cm)
1 mH = 1 000 000 nH (oder cm) = 10^6 nH (oder cm)

* Wirbelströme nennt man elektrische Ströme, die in Metallen entstehen, welche einem wechselnden Magnetfeld ausgesetzt sind. Die eine Verminderung der Spuleninduktivität bewirkenden Wirbelstromverluste werden sowohl durch in der Nähe der Spule befindliche Metallteile (Abschirmungen in Form von Bechern oder Blechen, Befestigungsteile, Bauelemente, z. B. Kondensatoren, u. a. m) als auch durch die im Spulenkern induzierten Wirbelströme hervorgerufen.

Die Tatsache, daß der Gleichstromwiderstand der Spule relativ gering ist und der Wechselstromwiderstand hohe Werte annimmt, wird in funktechnischen Schaltungen herangezogen, um Wechselstrom und Gleichstrom voneinander zu trennen. Da die Spule, ähnlich wie ein Kondensator, als Energiespeicher für magnetische Energie wirkt, nutzt man diese Eigenschaft bei elektrischen Schwingungskreisen aus.

1.1 Hochfrequenzspulen

HF-Spulen sind wichtige Bauelemente in Hochfrequenzschaltungen und demzufolge in Rundfunkgeräten, Kurzwellen- und Ultrakurzwellen-Empfängern sowie in Sendern und Fernsehgeräten anzutreffen. Vom zweckentsprechenden Aufbau der Spulen und der Verwendung des richtigen Werkstoffes hängt in weitem Maße die Funktion des Gerätes ab.

Hinsichtlich der Bauform werden 2 Arten unterschieden:

eisenlose Spulen (Luftspulen),
Kernspulen.

1.11 Luftspulen

Eine L u f t s p u l e hat keinen magnetischen Kern (Massekern, Ferritkern).
Die Windungen sind entweder freitragend angeordnet oder auf einem Wickelkörper aus Isoliermaterial aufgetragen.
Um eine hinreichende mechanische Stabilität der f r e i t r a g e n d e n S p u l e (Bild 4) zu erzielen, müssen starker Draht oder Rohr verwendet werden. Die Spulenlänge darf nicht zu groß sein. Infolge der geringen Windungszahl weisen diese Spulen eine nur kleine Induktivität auf. Indessen haben sie mit dem „Dielek-

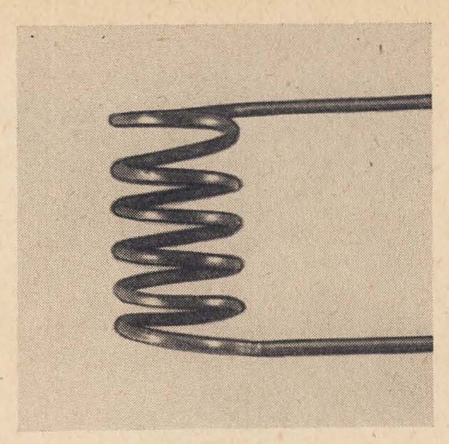


Bild 4 Freitragende Spule (Luftspule)

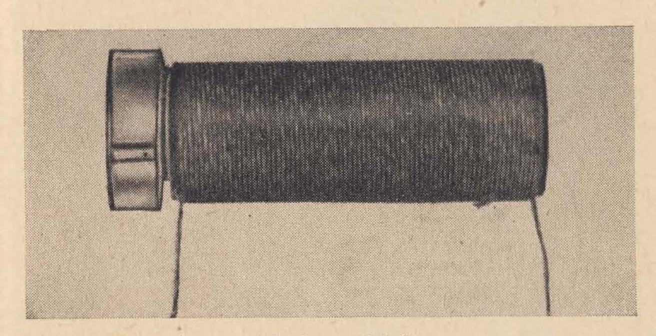


Bild 5 Zylinderspule, einlagig gewickelt

trikum Luft" den Vorzug geringer Temperaturabhängigkeit.

Auf einem Wickelkörper von zylindrischer Form kann eine Wicklung ein- oder mehrlagig aufgetragen werden. Diese Spulen nennt man Zylinderspulen (Bild 5). Bei einlagigen Spulen wird durch weite Windungsabstände eine kapazitätsarme Wicklung erzielt. Allerdings vermindert sich hiermit die an sich schon geringe Induktivität der Spule. Die mehrlagige

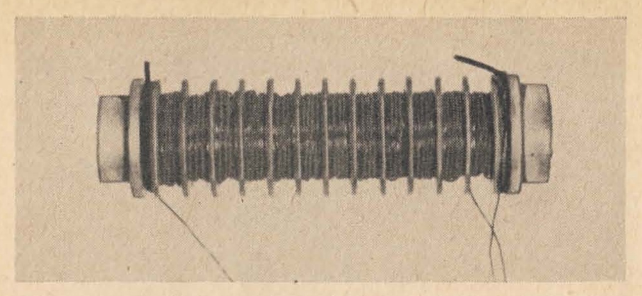


Bild 6 Spule mit Kammerwicklung

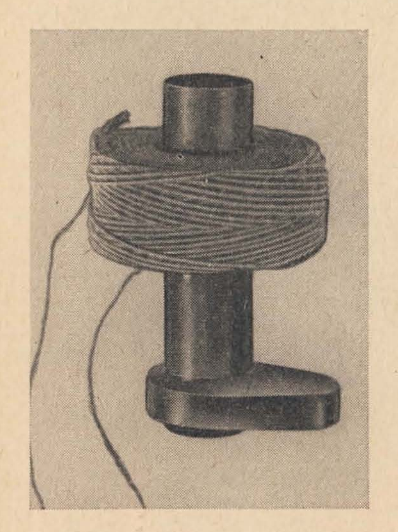


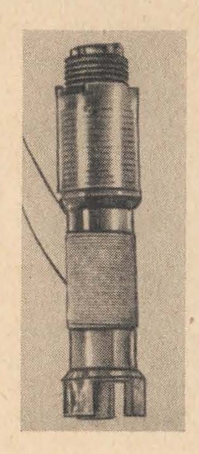
Bild 7
Spule mit Kreuzwicklung

Wicklung wird bevorzugt als Kammerwicklung ausgeführt (Bild 6). Durch die Aufteilung der Wicklung in 2 oder mehrere Kammern ergeben sich Spulen mit kleiner Eigenkapazität. Diese Eigenschaft hat auch die Kreuzwickelspule, da die Windungen auf ihrer gesamten Länge nicht mehr beieinanderliegen, sondern sich kreuzen (Bild 7). Andere Formen, die in den Anfangsjahren der Rundfunktechnik gebräuchlich waren,

beispielsweise die Honigwaben- oder Korbbodenspule, haben heute ihre Bedeutung verloren.

1.12 Kernspulen

Kernspulen sind Spulen mit einem Eisenpulver- oder Ferritkern (Massekernspule, Ferritkernspule) – Bild 8 –. Bei dieser Ausführung verlaufen die magnetischen Kraftlinien im Gegensatz zur Luftspule vorwiegend im Kern. Gegenüber dieser hat die Kernspule einige wesentliche Vorzüge aufzuweisen. Bei gleicher Induktivität sind die Spulenabmessungen erheblich geringer. Da durch eine kleinere Windungszahl Kupfer eingespart wird, vermindern sich die Kupferverluste.
Die Möglichkeit, durch Veränderung der Kernstellung Veränderung der Spuleninduktivität und somit einen Spulenabgleich zu erzielen, ist bedeutsam. Daß das Streufeld einer Kernspule gering ist, kann als ein weiterer Vorzug dieser Bauart gewertet werden.
Die Verluste sind bei den Masse- oder Ferritkernspulen qualitativ die gleichen wie bei der Luftspule.



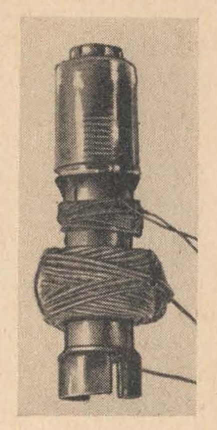


Bild 8
Kernspulen:
Zylinderwicklung,
Kreuzwicklung

2*

Hinzu kommen die Wirbelstromverluste, die durch das Kernmaterial verursacht werden. Sie haben einen wesentlichen Anteil an den Eisenverlusten und heben den Vorteil der kleineren Kupferverluste zum Teil wieder auf. Man hat jedoch Kerne entwickelt, insbesondere solche auf Ferritbasis, bei denen die Wirbelstromverluste vernachlässigbar klein sind.

Die Güte Q der Masse- oder Ferritkernspule hängt in weitem Maße von den Eigenschaften des Kernwerkstoffs und somit zum Beispiel von dessen Permeabilität ab. Die wirksame Permeabilität μ_w oder μ_{eff} stellt das Verhältnis der Induktivität einer Spule **mit** Kern (L_k) zur Induktivität der gleichen Spule **ohne** Kern (L_0) dar:

$$\mu_w = \frac{L_k}{L_0}.$$

Zur Kennzeichnung des Kernmaterials dient die Ringkernpermeabilität μ_R oder μ_A, auch als Werkstoffpermeabilität bezeichnet. Hierunter verstehen wir das Verhältnis der Induktion $\mathfrak{B}$ zur Felddichte $\mathfrak{H}$, gemessen an einem in sich geschlossenen, gleichmäßig bewickelten Kern aus magnetischem Material (Ringkern, Toroidmagnetkern) bei sehr schwachen Wechselfeldern, wie sie bei HF-Spulen vorwiegend auftreten.

Der durch Variation eines Abgleichkerns zu erzielende Abgleichbereich ergibt sich aus der Formel:

$$\triangle L = \frac{L_{max} - L_{min}}{L_{max}} \cdot 100\ \%.$$

L_{max} ist die höchste erreichbare Induktivität; sie stellt sich bei Kernstellung in der elektrischen Mitte ein. L_{min} ist die Induktivität in der Anfangsstellung des Kernes. In der Anfangsstellung befindet sich die Stirnfläche der Gewinde- (auch Schraub-), Rohr- und Stabkerne in einer Ebene mit der ersten Spulenbegrenzungsfläche, also mit der ersten Windung. Bei weiterem Herausdrehen des Kernes nimmt die Spuleninduktivität zwar noch wesentlich ab, die Spulengüte Q wird jedoch

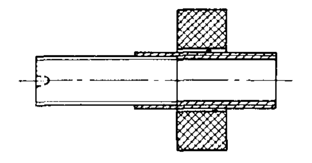


Bild 9
Der Abgleichbereich von Gewindekernen. Das Bild zeigt die Anfangsstellung des Kernes L_{min}); L_{max} wird bei der Kernstellung in der elektrischen Mitte eingestellt

noch weiter verschlechtert (Bild 9). Jedes Kernmaterial hat einen günstigsten Einsatzfrequenzbereich. Um für eine bestimmte Frequenz die beste Güte zu erreichen, muß das geeignete Kernmaterial gewählt werden. Bei der Berechnung der Induktivität einer Kernspule ist die Kernkonstante K zu berücksichtigen. Sie stellt eine für den Kernwerkstoff und die Spulenform charakteristische Größe dar.
Die Selbstinduktion L läßt sich für Kernspulen wie folgt berechnen:

$$L = w^2 \cdot K.$$

Daraus ergibt sich für die Windungszahl w:

$$w^2 = \frac{L}{K}, \quad w = \sqrt{\frac{L}{K}}$$

$$w = K_1 \cdot \sqrt{L}, \quad \frac{1}{\sqrt{L}} = K_1.$$

Werkstoff der Wicklung

Als Material dient im allgemeinen Kupferdraht, der bisweilen verzinnt oder, in besonderen Fällen, versilbert ist. Wenn sich die Windungen berühren, muß der Draht isoliert sein. Die Isolation besteht aus einem Lacküberzug oder/beziehungsweise und aus einer Kunstseideumspinnung; eine solche ist vorzuziehen, wenn eine möglichst große Spulengüte verlangt wird. Außer Volldrähten in Rundform sind für Spezialzwecke — bei großen einlagigen Spulen — Drähte mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt gebräuchlich. Im Gebiet der hohen Frequenzen (Kurz-, Ultrakurz-, Dezimeterwellen) empfiehlt sich die Verwendung von Kupfer-

rohr, um die Auswirkungen des Skin-Effekts gering zu halten. Durch Verwendung von Hochfrequenzlitze läßt sich im Lang- und Mittelwellenbereich eine Verbesserung der Spulengüte erzielen; im Kurzwellengebiet bringt Litzendraht keine Vorteile mehr. Bei der Verarbeitung dieses Drahtes ist zu beachten, daß alle Adern sorgfältig miteinander verlötet werden. Nachdem man die Isolation in einer Spiritusflamme abgebrannt hat, werden die bis zur Rotglut erhitzten Litzenenden in Spiritus abgeschreckt. Beim Verzinnen ist Kolophonium beizugeben. HF-Spulen mit hoher Güte, geringer Temperaturabhängigkeit und sehr kleiner zeitlicher Inkonstanz lassen sich auf keramischen Spulenkörpern aufbauen, wenn in deren Rillen Windungen aus einer Silber- oder Kupferschicht bei hohen Temperaturen eingebrannt werden. Diese Spulen sind für den Kurzwellenamateur besonders wichtig (Bild 10).

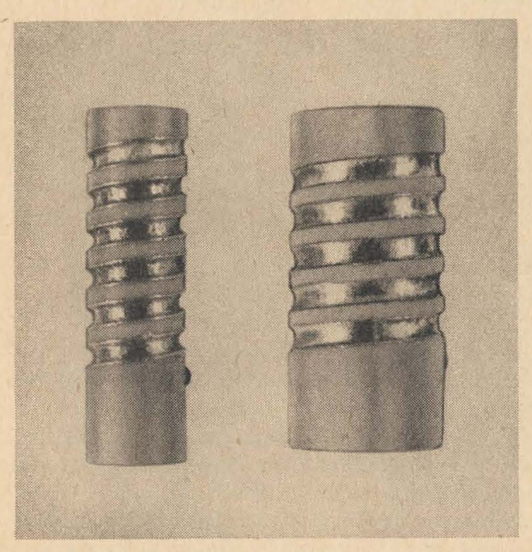


Bild 10 Keramische Spulenkörper mit eingebrannter Wicklung

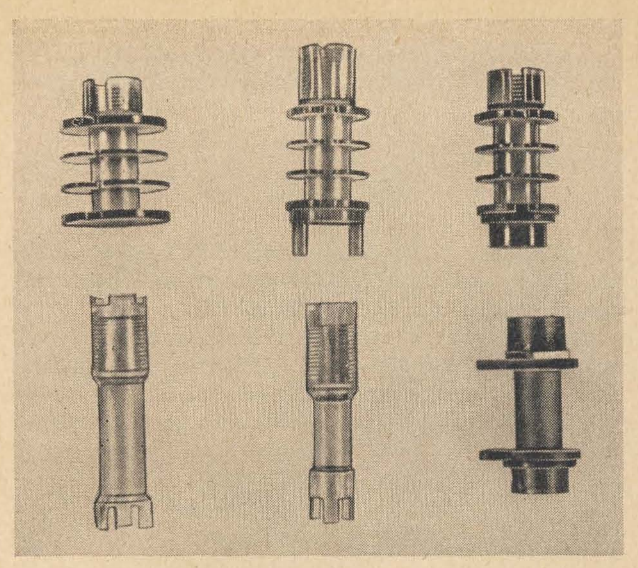


Bild 11 Moderne Spulenkörper in verschiedenen Ausführungen; Werkstoff Polystyrol

Werkstoff und Form des Spulenkörpers

Voraussetzung für geringe dielektrische Verluste ist die Verwendung verlustarmen Materials für den Spulenkörper. Besonders gut geeignete Isolierstoffe sind Polystyrol und Spezialkeramik, zum Beispiel Calit. Polystyrol ist ein glasklarer thermoplastischer Werkstoff mit einem Verlustfaktor tan δ 2 bis $5 \cdot 10^{-4}$ (bei f = 1 MHz) und hoher Wasserfestigkeit, Calit ein Magnesiumsilikat mit einem tan δ von 3 bis $8 \cdot 10^{-4}$ und großer mechanischer Festigkeit.

Im allgemeinen werden zylindrische Spulenkörper verwendet. Für Einlagenwicklung sind lange Körper bisweilen mit Rillen für die Aufnahme der Drahtwindungen versehen. Durch parallele Trennwände kann der Wicklungsträger in 2 oder mehrere Kammern auf-

geteilt werden. Er ist dann für die kapazitätsarme Kammerwicklung geeignet. Zur Aufnahme eines Gewindekerns sind die Spulenkörper mit einem kurzen Innengewinde versehen (Bild 11).

Werkstoff und Form des Kernes

Der Kernwerkstoff ist Eisenpulver, mit einem isolierenden Bindemittel durchsetzt (Massekern, HF-Eisenkern), oder ein gesinterter Ferrit (Ferritkern).

a) M a s s e k e r n e – Die heute verwendeten ferromagnetischen Werkstoffe sind Carbonyleisen- und Formiateisenpulver. Zur einwandfreien Isolation der Eisenpartikel (Korngrößen zwischen 1 und 15 μm) und als

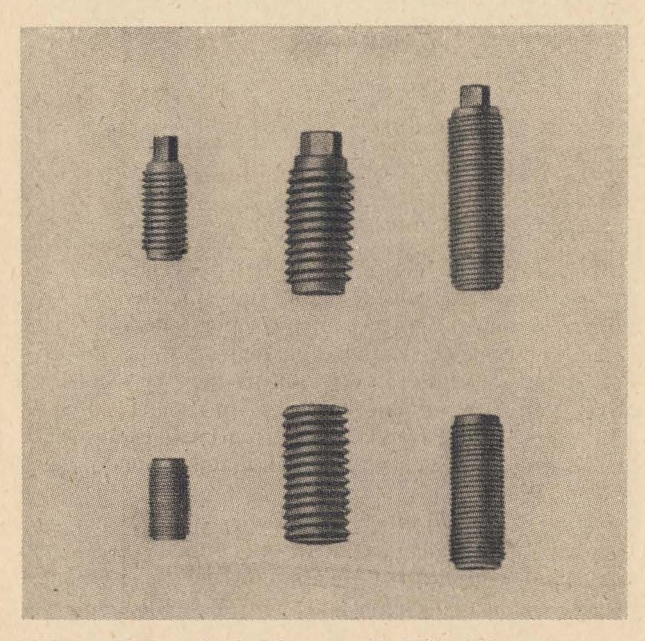
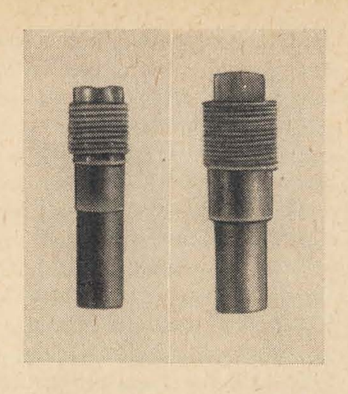


Bild 12 HF-Eisen-Gewindekerne nach TGL 7528

Bild 13
Ferrit-Stiftkerne
mit umpreßtem Gewinde



Bindemittel benutzt man organische und anorganische Substanzen unter Beimengung härtbarer Kunstharze. Sie werden gespritzt oder gepreßt.
Massekerne unterscheidet man nach ihrer Permeabilität. Für die Frequenzgebiete Lang-, Mittelwellen, Kurzwellen und Ultrakurzwellen sind verschiedene Massen gebräuchlich. Je nach dem Herstellungsverfahren, der Zusammensetzung und Form des Materials liegt die Permeabilität von Pulvermassen, wie sie für Massekerne üblicher HF-Spulen verarbeitet werden, zwischen 2 und 20.
Die Herstellungsverfahren der Kerne ermöglichen eine den Erfordernissen entsprechende Anpassung der Kernformen. Für HF-Spulen bevorzugte Formen sind:

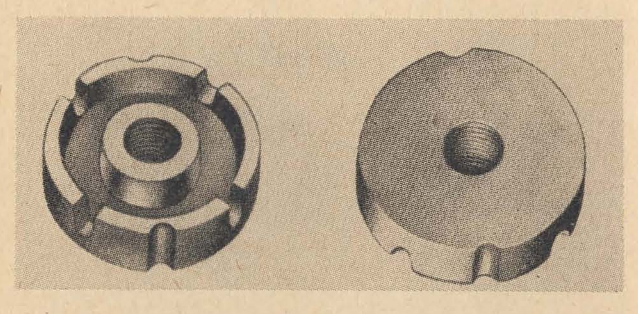
1. Gewindekerne (Schraubkerne), Zylinderkerne (Stiftkerne),
2. Schalenkerne, Topfkerne.

Gewinde- und Zylinderkerne finden wegen ihrer besonderen Vorzüge die häufigste Anwendung. Der Abgleich ist einfach und der Abgleichbereich groß. Im Gebiet der Ultrakurz-, Kurz-, Mittel- und Langwelle wird eine Ringkernpermeabilität von 5 bis 13 erzielt.
Die wirksame Permeabilität beträgt je nach Kerndurchmesser, Werkstoff und Frequenz 1,2 bis 2,4 und entspricht einem Abgleichbereich von 20 bis 50 Prozent.

S c h r a u b k e r n e haben auf der einen Seite einen Schlitz von 3 bis 4 mm Länge, auf der anderen Seite meist einen Sechskant. Je nach dem geforderten Abgleich – grob oder fein – ist das Gewinde entsprechend ausgebildet. Die Länge der Kerne beträgt 12 bis 35 mm, der Durchmesser 5,5 bis 8,5 mm (Bild 12).

Z y l i n d e r k e r n e für abgleichfähige HF-Spulen haben auf einer Seite einen mit einem Schraubenzieherschlitz oder einem Sechskant versehenen Gewindekopf (Bild 13).

Bei S c h a l e n k e r n e n ist der Eisenweg allseitig geschlossen, die Kupferwicklung abgeschirmt. Das Streufeld ist äußerst gering und gegenseitige Kopplung mit benachbart aufgebauten Spulen praktisch ausgeschlossen (Bild 14).



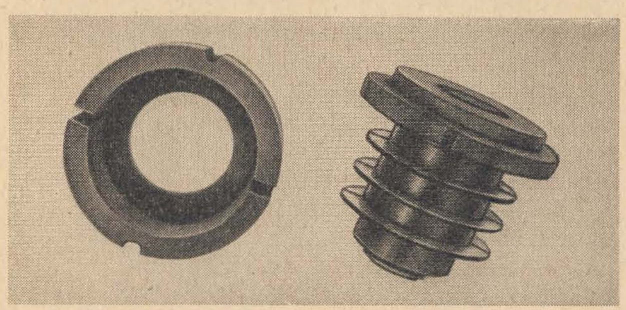


Bild 14 HF-Eisen-Schalenkerne nach TGL 7529

Topfkerne haben einen etwas abgewandelten Aufbau.
Beide Typen werden für hochwertige Schwingkreis- und Filterspulen mit einem Luftspalt verwendet, der symmetrisch in die Butzen der beiden Schalenhälften eingeschliffen ist. Der Spulenabgleich kann sowohl mit Schraub- als auch Stiftkernen erfolgen. — Mit Schalen- und Topfkernen lassen sich Spulen von extrem hoher Güte herstellen (bis 500).

b) *Ferritkerne* — Für die Herstellung von Ferrit-Spulenkernen kommen Mischferrite in Betracht. Diese bestehen aus Kristallen mit Spinellstruktur von Eisenoxyd und Oxyden zweiwertiger Metalle, wie Mangan, Zink, Kupfer, Nickel, Kobalt, Magnesium und anderer. Ferrite unterscheiden sich also grundlegend von den Pulvereisenwerkstoffen. Das Material ist auf keramischer Grundlage aufgebaut. Die in einem Sinterprozeß hergestellten Kerne haben geringe elektrische Leitfähigkeit.

In der Deutschen Demokratischen Republik wird der Kernwerkstoff Ferrit unter der Bezeichnung „Manifer" gefertigt. Durch einen Ferritkern kann die Güte einer Spule beträchtlich erhöht werden. Durch Verwendung eines Ferritkernes wird bei gleicher Güte ein geringeres Volumen erzielt. Die Ferritspule hat eine etwa 2,5mal höhere Güte als die unabgeschirmte und eine ungefähr 4mal höhere Güte als die abgeschirmte Pulverkernspule gleichen Volumens. Selbst im Gebiet der hohen Frequenzen wird infolge der größeren effektiven Permeabilität noch eine Verbesserung des Gütefaktors erreicht. Im UKW-Bereich ist die höhere Güte in erster Linie den geringeren Kupfer- und Wirbelstromverlusten zuzuschreiben. Die Bilder 15, 16 und 17 zeigen die Gütekurven für verschiedene Spulen mit Pulverkernen und Ferritkernen.
Die Formgebung der Ferritkerne erfolgt wie bei den Massekernen, also können die gleichen Kernformen hergestellt werden.

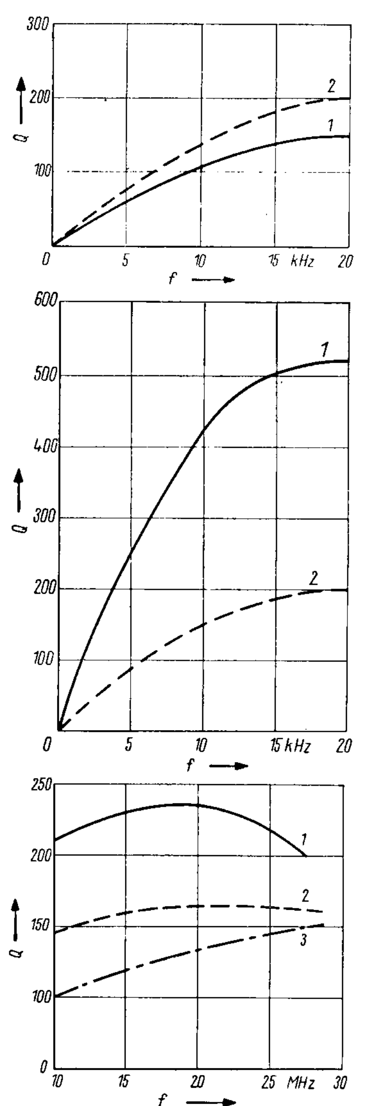


Bild 15
Vergleich von Topfkernspulen gleicher Güte; 1 – Ferritkern, Volumen 2 cm³, 2 – Carbonyleisenkern, Volumen 20 cm³

Bild 16
Vergleich der Güte zweier Topfkernspulen mit gleichem Volumen; 1 – Ferritkern, Volumen 20 cm³, 2 – Carbonyleisen, Volumen 20 cm³

Bild 17
Gütevergleich einiger Kurzwellenspulen;
1 – KW-Ferritkern, 2 – HF-Carbonyleisenkern, 3 – kernlose Spule

Für den Aufbau von Maniferkernspulen kann die folgende Werkstofftabelle von Nutzen sein:

Werkstoff Manifer	Anfangs-permeabilität μ_A	Frequenzbereich	Bauform*
110	100	0,3 bis 3	G + Z
140	400	0,1 bis 1,5	G + Z + S
163	1000	0,001 bis 0,3	S
173	1500	0,001 bis 0,3	S
183	2200	0,001 bis 0,3	S
210	6	30 bis 100	Z
220	15	10 bis 50	Z
230	36	5 bis 25	G + Z

* G = Gewindekern, Z = Zylinderkern, S = Schalenkern

Standardisierung, Normung

Soweit eine Standardisierung nach TGL erfolgt ist, wurde diese in der nachstehenden Übersicht berücksichtigt.

Kreuzwickelspulen
(Erläuterung und Begriffe) DIN 41283

Spulenkörper für Topfkerne DIN 41288

Spulenkörper für Hör- und Fernsehrundfunkempfänger TGL 14277 Entw.

Gewindekerne aus Pulvereisen
(Abmessungen) TGL 7528

Schalenkerne und Abgleichstifte aus Pulvereisen
(Abmessungen) TGL 7529

Schalenkerne aus Pulvereisen
(technische Lieferbedingungen) TGL 9262

Werkstücke aus oxydkeramischen Werkstoffen (Begriffe)
— Zylinderkerne, Zylinderkerne mit Gewinde, Topfkerne, Schalenkerne — TGL 13094 Entw.

Zylinderkerne aus oxydkeramischen Werkstoffen mit Gewinde TGL 4817

desgleichen ohne Gewinde TGL 4818

Antennenstäbe (Ferrit), rund TGL 64-2010
(Fachber. Standard)

Anwendung

Das Anwendungsgebiet der verschiedenen Spulenarten und ihrer Ausführungsformen ist umfangreich.
In Kurzwellen- und Ultrakurzwellensendern richtet sich die Ausführung nach den Stufen, in die die Spulen eingesetzt werden sollen. Infolge der zu fordernden hohen Frequenzkonstanz sind im Oszillator keramische Wickelkörper mit aufgetragener oder eingebrannter Spulenwicklung am zweckmäßigsten. Bei Oszillatorfrequenzen bis etwa 5 MHz ist die Verwendung von Kernspulen möglich besonders dann, wenn diese Stufe mit normalen Empfängerröhren bestückt ist. In stärkeren Treiber- und Leistungsstufen sind bei Leistungen bis 50 W Spulendrähte bis etwa 2 mm Durchmesser verwendbar; bei höheren Leistungen im UKW-Gebiet sollte möglichst versilbertes Kupferrohr mit ausreichendem Durchmesser verarbeitet werden. Der Aufbau kann bei guter Stabilität freitragend erfolgen.
In modernen Rundfunk-, Amateur- und Fernsehempfängern sind für nahezu alle Funktionen abgleichbare Kernspulen gebräuchlich. Sie arbeiten

a) als Kreisspulen im Gitter-, Anoden- und Oszillatorkreis, im Zwischenfrequenzverstärker, im Sperr- oder Saugkreis;

b) als Koppelspulen im Antennenkreis, im Rückkopplungskanal und im Zwischenfrequenzverstärker.
Im Falle a) ist vor allem der Gütefaktor der Spule mitbestimmend für die Güte des Schwingkreises.
Kopplungsspulen bewirken eine induktive Übertragung elektrischer Energie von einem Stromkreis auf einen anderen (Hochfrequenzübertrager, induktive Kopplung durch gegenseitige Induktion). Je nach dem Grad der Kopplung sind lose und feste Kopplung zu unterscheiden. Einerseits ist der Kopplungsgrad von der Entfernung beziehungsweise Lage der Spulen von- oder zueinander, andererseits von den Kernstellungen abhängig (Bild 18). Bei konstanter Primärspannung

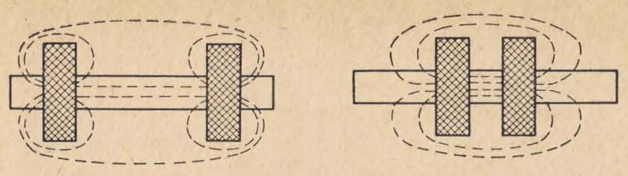


Bild 18 Induktive Kopplung; a) lose Kopplung, b) feste Kopplung

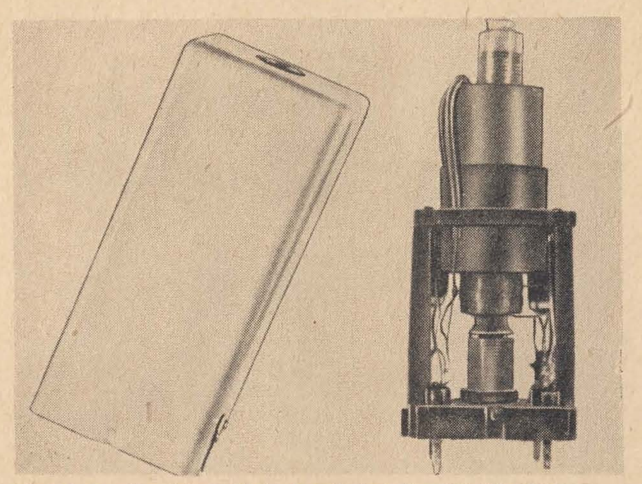


Bild 19 Zweikreisiges Klein-Bandfilter für ZF 473 kHz

überträgt eine lose Kopplung geringe Spannung in den Sekundärkreis, bei fester Kopplung wird die Sekundärkreisspannung größer.
Wichtige Hochfrequenzübertrager sind die Zwischenfrequenz-Bandfilter im Super (Bild 19). Sie bestehen in der Regel aus 2 Schwingkreisen, die auf die gleiche Frequenz abgestimmt sind (Zweikreis-Bandfilter). Die vorwiegend gebräuchliche induktive Kopplung der Kreise kann unterkritisch (lose), kritisch oder überkritisch (fest) sein (Bild 20). Bestimmend für die Verstärkung und Trennschärfe des Empfängers ist die Güte der Filter, die nach der Form ihrer Resonanzkurve beurteilt wird, und die Kopplung der Kreise.

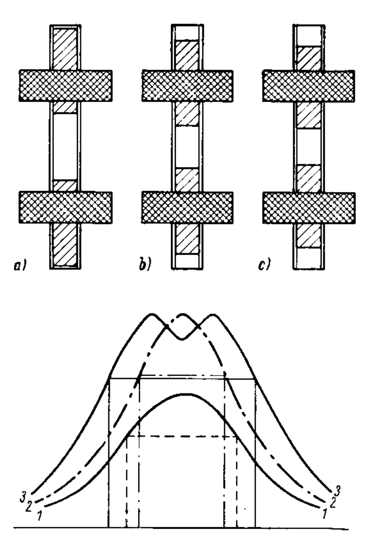


Bild 20
Der Kopplungsgrad in Abhängigkeit von der Kernstellung;
a) unterkritisch (lose),
b) kritisch,
c) überkritisch (fest)

Bild 21 Resonanzkurven zweikreisiger Bandfilter; Kurve 1 — Bandbreite groß, Energieübertragung mäßig groß, Trennschärfe gering, Kurve 2 — Bandbreite klein, Energieübertragung gering, Trennschärfe groß, Kurve 3 — Bandbreite groß, Energieübertragung groß, Trennschärfe groß

Bei der für ZF-Filter typischen Kopplung geht die Resonanzkurve der Kreise in eine breite Kurve mit steilen Flanken über und bildet eine Einsattlung aus (Bild 21). Diese Kurve läßt ein relativ schmales Frequenzband durch und erfüllt damit die Bedingungen für hohe Trennschärfe. Gelegentlich sind auch Bandfilter in Eingangsschaltungen anzutreffen. Sie haben die Aufgabe, das Empfangsgerät gegen Spiegelfrequenzen, Zwischenfrequenz- und sonstige außerhalb des Bandes liegende Störungen unempfindlich zu machen, dagegen das gewünschte Frequenzband ungehindert durchzulassen. Bandfilter müssen mit einem Metallbecher (Aluminium) abgeschirmt werden. Bei einfachen Kernspulen darf die Abschirmung nicht zu eng sein,

damit eine übermäßige Dämpfung vermieden wird, denn diese bedeutet eine Güteverschlechterung. Indessen lassen sich Abschirmbecher kleinsten Ausmaßes, die den Anforderungen nach Verkleinerung aller Bauteile für Kleingeräte gerecht werden, in Verbindung mit Topfkernen hoher Permeabilität verwenden. So besitzen Ferrit-Topfkerne mit einem $\mu_A > 100$ ein derart ge-

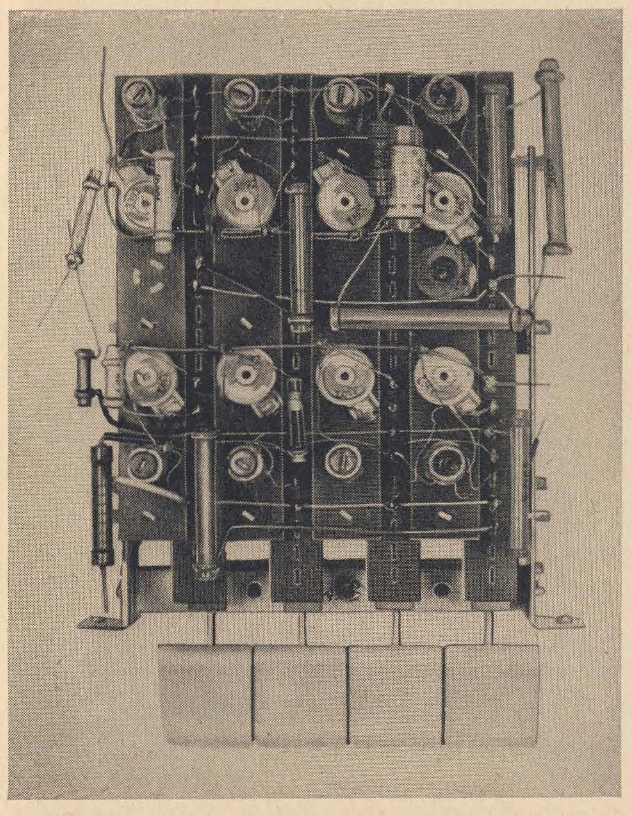


Bild 22 Super-Spulenaggregat (2mal Kurz-, Mittel-, Langwelle), Umschaltung durch Drucktasten

drängtes Streufeld, daß der dämpfende Einfluß eines engen Bechers ganz unerheblich ist.

In Rundfunkempfängern ist die Mehrzahl der HF-Spulen zu einer abstimmbaren Einheit, dem Spulensatz oder Spulenaggregat (Bild 22, 23), zusammengefaßt, wobei die jeweils frequenzbestimmende Spule zur Wahl des Empfangsbereichs mit einem Tasten- oder Drehschalter eingeschaltet wird. Bei einer speziellen Ausführung, dem vorwiegend in Fernsehgeräten und häufig auch in kommerziellen und Amateurempfängern verwendeten Spulenrevolver, sind alle Spulen eines Bereiches auf Platten aus hochwertigem Isolierstoff befestigt. Diese verbindet man in geeigneter Weise mit einer Drehachse und schaltet sie nach Art des drehbaren Objektivrevolvers, zum Beispiel eines Mikroskops. Ein Lagerbock enthält die Spulengegenkontakte; in jeder Betriebsstellung erfolgt eine automatische Einrastung. Der Vorzug des Spulenrevolvers gegenüber anderen Schalteranordnungen besteht in der kürzeren Leitungsführung, die vorwiegend im Gebiet der höheren Frequenzen unerläßlich ist, sowie in der guten gegenseitigen Entkopplungsmöglichkeit der Einzelspulen. In Oszillatorstufen, in denen an Konstanz und Reproduzierbarkeit erhöhte Anforderungen gestellt werden, müssen die Schalter kontaktsicher sein (Kontaktübergangswiderstand einige mOhm). Weitere Anwendungsmöglichkeiten der HF-Spule stellen Variometer, Kurzwellenlupen und Ferritantennen dar.

V a r i o m e t e r sind Anordnungen mit stetig (kontinuierlich) regelbarer Induktivität. Die Regelung erfolgt durch geeignete gegenseitige Verschiebung oder Verdrehung zweier Spulen. Hierbei ändert sich deren Gegeninduktivität und damit die Gesamtinduktivität der Anordnung.

In Empfängerschaltungen werden zur induktiven (L-, Permeabilitäts-)Abstimmung S p u l e n k e r n v a r i o m e t e r verwendet. Sie bestehen aus einer Zylinderspule (Einlagen-Wicklung auf einem Hohlzylinder ge-

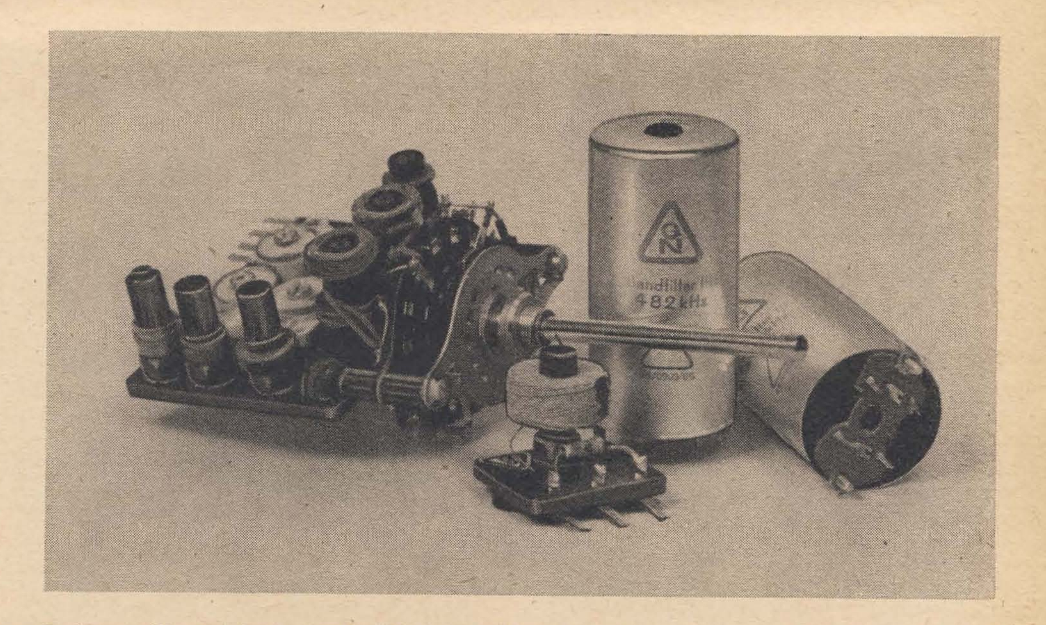


Bild 23 Super-Spulensatz (Kurz-, Mittel-, Langwelle), 2 Bandfilter, Sperrkreis; Umschaltung durch Drehschalter

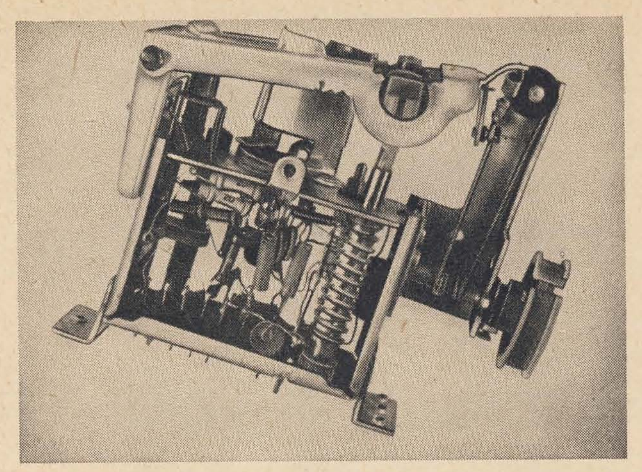


Bild 24 Spulenkernvariometer für UKW als Abstimmorgan im Tuner (Abstimmeinheit)

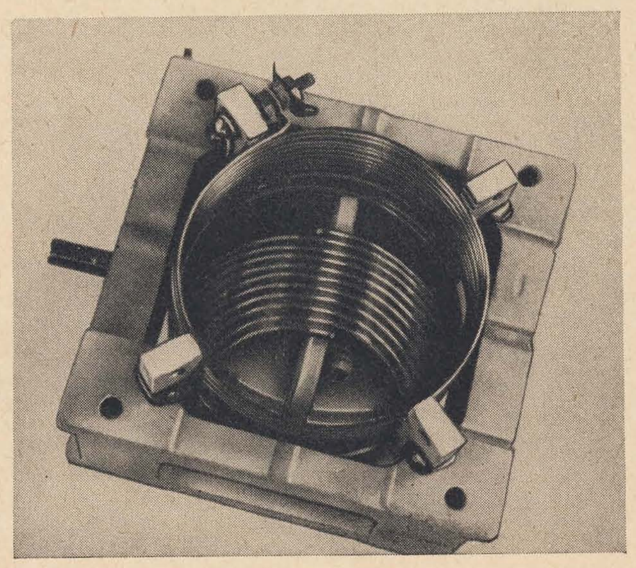


Bild 25 Drehspulvariometer für KW-Sender

ringer Wandstärke aus Hartpapier oder dem hochwertigeren Polystyrol). in deren Innerem ein HF-Eisen- oder Ferritstabkern durch Seilzug oder einen anderen Mechanismus verschiebbar angeordnet ist (Bild 24). Spulenkernvariometer sind heute bevorzugt in UKW-Abstimmkreisen gebräuchlich. Hier werden häufig Abstimmkerne aus Aluminium oder Messing verwendet. Die Veränderung der Induktivität ist dann umgekehrt: Kern in Spulenmitte geringster, außerhalb dieser größerer beziehungsweise maximaler L-Wert.
In der Sendertechnik sind für die Induktivitätsabstimmung Kugel- oder Drehspulenvariometer (Bild 25) üblich. Bei dieser Bauart ist in einer feststehenden Spule — analog dem Stator des Drehkondensators — eine kleinere Spule (Rotor) drehbar angeordnet. Die Spulenwindungen aus starkem Kupferdraht sind meist auf Spulenträgern aus keramischem Material (Calit) aufgebracht. Unter Umständen versieht man die Rotorspule zur Permeabilitätsvergrößerung mit einem Massekern.

Die Kurzwellenlupe besteht aus einer Zylinderspule mit einlagiger Wicklung aus verhältnismäßig starkem Kupferdraht (Bild 26). Durch einen mit Hilfe Seilzugs verschiebbaren Kern wird, ähnlich wie beim Spulenkernvariometer, die Induktivität der Spule verändert. Diese ist meist der Kurzwellen-Oszillatorspule des Empfängers parallelgeschaltet. KW-Lupen gestatten eine Spreizung der schmalen Bänder, zum Beispiel des 19-m- und 25-m-Bandes, erleichtern also die Abstimmung wesentlich.

Die Ferritantenne stellt eine magnetisch wirkende Antenne dar. Ihr Kennzeichen ist ein mit einer oder mehreren Wicklungen versehener, drehbar oder fest angeordneter Ferritstab (Bild 27).

Es werden Stablängen von 63, 100, 125, 160 mm bei einem Durchmesser von 8 mm und solche von 160 und 200 mm, Durchmesser 10 mm, gefertigt. Ferritantennen haben nur im Gebiet der Mittel- und Langwellen einen

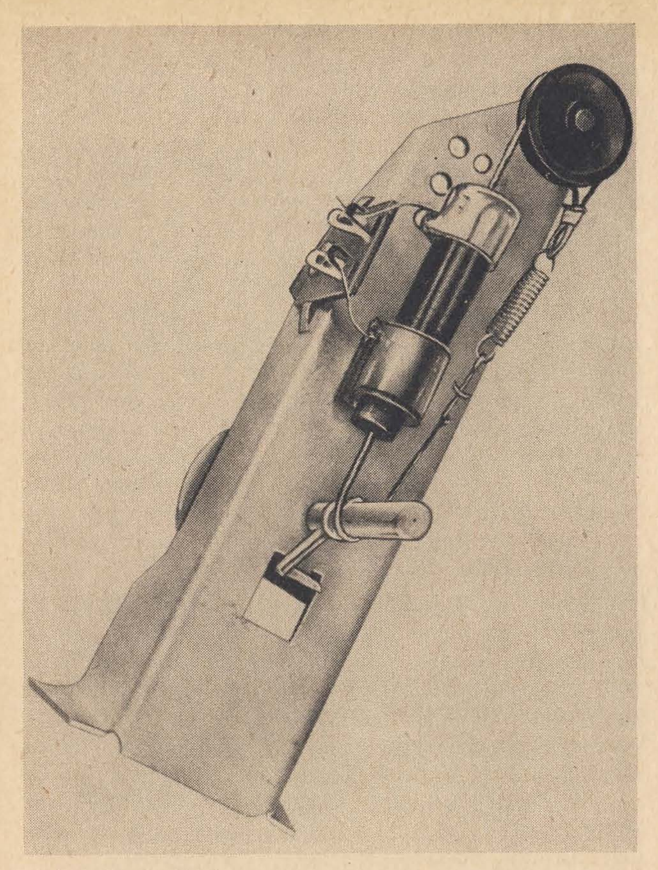


Bild 26 Kurzwellenlupe

hinreichenden Wirkungsgrad. Die entsprechenden Spulen sind über dünnwandige Trägerkörper aus Hartpapier oder Polystyrol, die den Stab umschließen, gewickelt. Die einwandfreie Funktion der meist im Empfängergehäuse untergebrachten Antenne hängt im wesentlichen von ihrer richtigen Dimensionierung ab. Von Einfluß sind die Abmessungen der Stäbe und der Spulen

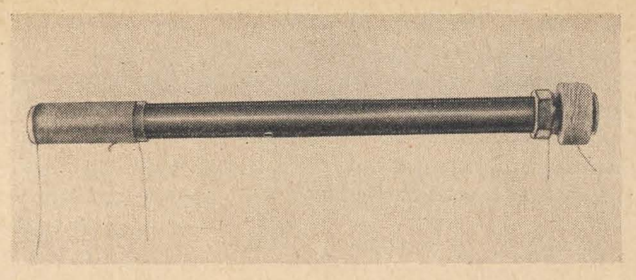


Bild 27 Ferritantenne

sowie Drahtsorte und Wicklung. Die Stäbe bringt man möglichst hoch über dem Metallchassis und weitab von sonstigen Metallteilen isoliert an.

Die Ferritantenne hat 2 bedeutende Vorzüge:

a) Da sie eine besondere Form der Rahmenantenne darstellt, besitzt die Ferritantenne eine Richtwirkung. Sie gestattet, unter bestimmten Voraussetzungen, Störsender zu unterdrücken. Maximale Empfangsleistung wird erzielt, wenn der Stab quer zur gewählten Sendestation gerichtet ist. In bezug auf die Auspeilung eines Störsenders ist der günstigste Fall der, daß sowohl dieser als auch der Nutzsender, das heißt der Sender, der empfangen werden soll, mit dem Empfangsort einen Winkel von 90° bilden.

b) Der Empfang wird durch elektrische Nahstörfelder nicht oder nur mäßig beeinflußt.
Nachteilig wirkt sich die geringe effektive Höhe dieser Antennen aus; demzufolge liefern sie keine große Empfangsspannung. Sie entspricht bestenfalls der einer Zimmerantenne von einigen Metern Länge.

1.2 Drosseln (Drosselspulen)

Die Drossel ist ein Bauelement in Form einer Spule, das für die zu „drosselnde“ (sperrende) Frequenz einen großen induktiven Widerstand hat. In funktechnischen

Schaltungen werden Hochfrequenz- und Niederfrequenzdrosseln verwendet.
Grundsätzlich weist die Drossel die Eigenschaften der Spule auf, so daß die eingangs erläuterten Begriffe wie Induktivität, induktiver Widerstand, Permeabilität, Verlustwiderstand, Eigenkapazität und andere auch für die Drossel Gültigkeit haben.

1.21 *Hochfrequenzdrosseln*

Als ein im Hochfrequenzgebiet arbeitendes Bauelement muß die HF-Drossel für die zu sperrende Hochfrequenz einen großen induktiven Widerstand haben, dagegen soll der Widerstand für Gleichstrom und niederfrequente Ströme klein sein. Je kleiner die Eigenkapazität einer Drossel ist, um so höhere Frequenzen können gesperrt werden.
Die Bauform der Hochfrequenzdrossel wird durch ihren Verwendungszweck bestimmt. Dieser entscheidet, ob sie als Resonanzdrossel (abgestimmte Drossel) oder als aperiodische Drossel eingesetzt wird.
Im Gebiet der Ultrakurzwellen und Kurzwellen werden HF-Drosseln freitragend oder auf einen zylindrischen Isolierkörper mit hoher Dielektrizitätskonstante (Polystyrol oder Keramik) einlagig oder — im niedrigeren Frequenzbereich — als Kreuzwickelspule gewickelt. Senderdrosseln müssen über gute mechanische Stabilität verfügen. Dem Umstand, daß bei unrichtiger Dimensionierung Drosselstörwellen auftreten, die den Sender auf einer anderen als der vorgesehenen Frequenz schwingen lassen, ist Rechnung zu tragen.
Im Gebiet der Mittel- und Langwellen bevorzugt man Drosseln mit Kreuzwicklung, die mit einem Masse- oder Ferritkern versehen sind.
Bei Resonanzdrosseln wird die Eigenkapazität der Wicklung zur Sperrwirkung der Drossel für eine Frequenz oder ein schmales Frequenzband aus-

genutzt. Da die Eigenkapazität eine Parallelkapazität darstellt, bildet sie mit der Spule einen Schwingkreis. Dessen Eigenfrequenz wird von den Spulendaten bestimmt. Die Drossel setzt somit dieser Resonanzfrequenz einen großen Widerstand entgegen.

Zur Berechnung der Drahtlänge l für eine Kurzwellen-Zylinderdrossel gilt, bei einem Spulendurchmesser bis etwa 20 mm, die Formel:

$$l = 0{,}25 \cdot \lambda;$$

(λ = Betriebswellenlänge).

Für UKW-Resonanzdrosseln im Amateurband gilt:

$$l \approx 0{,}55 \cdot \lambda,$$
$$w \approx \lambda/11 \cdot D,$$
$$d \approx 3 \cdot D/w \approx 17 \cdot D^2/\lambda;$$

(w = Windungszahl, D = Wickeldurchmesser, d = Drahtstärke, alle in m eingesetzt).

Die aperiodische Drossel hat bei richtiger Dimensionierung über einen großen Frequenzbereich gute Sperrwirkung. Die Voraussetzung hierfür bildet die geringe Eigenkapazität der Drossel. In diesem Falle ist nämlich der kapazitive Nebenschluß so unbedeutend, daß sie die zu sperrende Hochfrequenz nicht abfließen läßt. Bei aperiodischen Kurzwellendrosseln liegen die Windungen im ersten Drittel oder bis etwa zur Hälfte dicht beieinander; der Windungsabstand wächst sodann zum „heißen" (hochfrequenten) Ende hin – etwa logarithmisch – an (Bild 28). Eine andere Wicklungsart ist durch eine Unterteilung der Wicklung gekennzeichnet. Die Windungszahlen der Teilwicklungen verhalten sich etwa wie 4 : 2 : 1, wobei die kurze Wicklung das „heiße" Ende ist. Beide Ausführungen erfüllen in hohem Maße die Anforderungen an eine kapazitätsarme Wicklung. Es muß jedoch dafür gesorgt

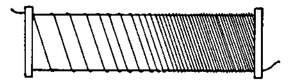


Bild 28
Aperiodische KW-Zylinderdrossel

werden, daß die Resonanzstelle oberhalb der höchsten Betriebsfrequenz liegt. Die Drosseln sind so zu dimensionieren, daß sie für die jeweils gewünschte tiefste Frequenz eine noch hinreichende Drosselwirkung haben. Für die höheren Frequenzen steigt die Drosselwirkung.

Anwendung

HF-Drosselspulen werden als Sperren in Heiz-, Anoden-, Schirmgitter-, Gitter- und Regelspannungsleitungen verwendet. In Amateursendern spielt die Resonanzdrossel bei der Parallelspeisung der Anode eine besondere Rolle. Die Drossel muß so dicht wie möglich an der Stelle eingesetzt werden, an der die HF zu sperren ist. Auf Entkopplung achten! Auch in der Entstörtechnik sind HF-Drosseln nützlich: In Verbindung mit 2 Kondensatoren in die Netzzuleitung geschaltet, können HF-Störungen vom Empfangsgerät ferngehalten werden.
Bild 29 zeigt als Beispiel eine UKW-Kleinstdrossel.

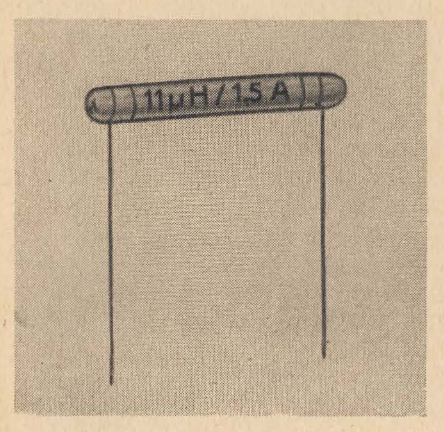


Bild 29 UKW-Kleinstdrossel

Sie ist als einlagige Zylinderspule aufgebaut und mit einem Ferritkern versehen, der durch Epoxydharz fest mit der Wicklung verbunden ist. Die Resonanz liegt außerhalb des Betriebsfrequenzbereichs, so daß die Drossel in den Fernsehbändern und dem UKW-, Rundfunk- sowie dem Amateur-2-m-Band in ihrem Scheinwiderstandsverlauf induktiven Charakter hat.

1.22 Niederfrequenzdrosseln

Diese im Niederfrequenzgebiet gebräuchlichen Drosseln haben relativ große Windungszahlen. Da die erforderliche hohe Induktivität von mehreren Henry mit diesen allein nicht erreichbar ist, sind NF-Drosseln in jedem Fall mit einem Eisenkern versehen. Im Tonfrequenzbereich von 16 bis 20 000 Hz arbeitende Drosseln heißen Tonfrequenzdrosseln. Die Drosseln, welche die Brumm- und Welligkeitsspannung in dem Netzteil eines funktechnischen Gerätes aussieben sollen, bezeichnet man als Netzdrosseln.

1.221 Tonfrequenzdrosseln

Im Bereich der hohen Tonfrequenz können Tonfrequenzdrosseln mit HF-Eisen- oder Ferritkernen aufgebaut werden. Es kommen im wesentlichen Schalenkerne, E/I- oder U-Kerne in Betracht. Im übrigen wird ein aus Transformatorenblech gefertigter, zur Herabsetzung der Wirbelströme geschichteter (lamellierter) Eisenkern verwendet. Dieser ist meist als Mantel ausgeführt, der die auf einem Isolierkörper aufgetragene Wicklung umschließt. (Im Abschnitt über Transformatoren wird auf diese Kernausführungen ausführlich eingegangen.)
Wird eine NF-Drossel außer von einem niederfrequenten Strom von einem Gleichstrom durchflossen, dann

erfolgt eine Gleichstromvormagnetisierung. Diese ist unter Umständen so groß, daß das Eisen magnetisch gesättigt und folglich für das Wechselfeld völlig wirkungslos werden kann. Die Induktivität wird dadurch auf ein Minimum herabgesetzt. Der Kern muß in diesem Falle mit einem Luftspalt versehen werden. Normalerweise setzt das die Induktivität der Drossel herab. Da jedoch bei Gleichstromvormagnetisierung die Sättigung (durch Abschwächung des magnetischen Flusses) vermieden wird, tritt in diesem Falle eine Vergrößerung der Induktivität auf.

Anwendung

Tonfrequenzdrosseln (Bild 30) können verwendet werden:

als Kopplungselemente in hochohmigen Kreisen von NF-Verstärkerstufen,

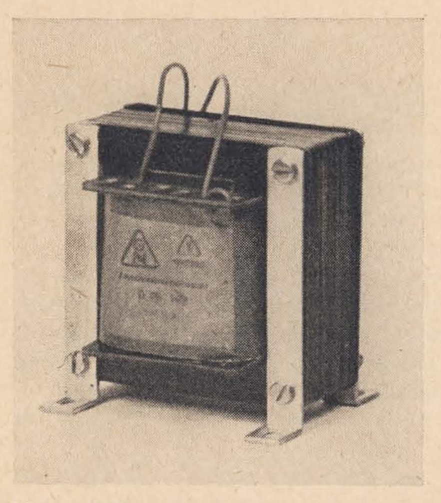


Bild 30 Tonfrequenzdrossel

in Weichenschaltungen bei der Ankopplung von Lautsprechern,
in Amateurempfängern bei Telegrafieempfang zur niederfrequenten Abstimmung der Tonselektion. Hierbei benutzt man einen fest abgestimmten Drossel-/Kondensator-Kreis oder ein aus Drossel, Regelwiderstand und Festkondensator bestehendes, regelbares Filterglied. Mit diesen Anordnungen kann eine weitgehende Abschwächung oder sogar völlige Beseitigung von Störungen aller Art, also auch von Interferenzstörungen, erzielt werden; ferner ist die Wahl einer dem Ohr angenehmen Tonhöhe möglich.

1.222 Netzfrequenzdrosseln (Netzdrosseln)

Ihrem Verwendungszweck entsprechend besitzen diese Drosseln eine sehr hohe Induktivität. Demzufolge haben sie große Windungszahlen und sind ausschließlich mit einem lamellierten Eisenkern in M- oder E/I-Ausführung versehen. Der wegen der Gleichstrombelastung der Drossel notwendige Luftspalt ist beim M-Kern durch den verkürzten Mittelsteg gegeben, beim E/I-Kern wird zwischen beide Teile eine der Luftspaltbreite entsprechende Hartpapier- oder Preßspaneinlage eingefügt. Netzdrosseln sind so dimensioniert, daß sie der Netzfrequenz, die in Europa einheitlich 50 Hz (in Amerika 60 Hz) beträgt, einen großen induktiven Widerstand entgegensetzen.
Es werden 1000 bis 5000 Windungen, die auf einem Isolierkörper aus Hartpapier, Preßspan oder Preßstoff aufgebracht sind, benötigt. Die Drahtstärke, die zwischen 0,1 und 0,3 mm liegt, wird durch die Belastbarkeit bestimmt. Die Wicklung hat einen Gleichstromwiderstand von 100 bis 1500 Ohm. Die Selbstinduktion liegt im Bereich von 10 bis 50 H, die Strombelastung zwischen 20 und 200 mA.

Anwendung

Die Netzdrossel wird als Bestandteil eines Siebgliedes, das noch 2 Kondensatoren großer Kapazität umfaßt, zur Glättung eines von einem Gleichrichter abgegebenen pulsierenden Gleichstromes, das heißt Gleichstromes mit einer Wechselstromkomponente, benutzt. In älteren Rundfunkempfängern wurde meist die Erregerspule des elektrodynamischen Lautsprechers, die als Drosselspule aufgefaßt werden kann und daher die gleichen Eigenschaften wie diese hat, als Siebdrossel herangezogen. Voraussetzung hierfür: Die Erregerspule muß niederohmig sein. Dies ist meist der Fall.
Unter Netzdrosseln werden auch Drosselspulen verstanden, die in die Netzzuleitung eines gegen HF-Störungen empfindlichen Gerätes eingeschaltet werden, um diese unwirksam zu machen. Solche Drosseln sind Hochfrequenzdrosseln!

2. TRANSFORMATOREN, ÜBERTRAGER

Allgemein sind unter „Transformatoren“ Bauelemente zur Leistungsübertragung bei einer festen Frequenz zu verstehen. Solche Typen, die zur Übertragung von Tonfrequenzspannungen und außerdem zur Widerstandsanpassung über ein mehr oder weniger breites Frequenzband dienen, werden in der Fachsprache „Übertrager“ genannt. (Im folgenden wird bei der allgemeinen Betrachtung die Bezeichnung „Transformator“ gebraucht.)

Der Transformator besteht aus 2 oder mehr miteinander gekoppelten Wicklungen, der Primärwicklung und der bzw. den Sekundärwicklungen. Die Wicklungen aus isoliertem Draht sind auf einem Isolierkörper aufgebracht. Dem Verwendungszweck entsprechend haben Transformatoren Kerne von verschiedener Form und aus unterschiedlichem Werkstoff. Während bei Hochfrequenzübertragern getrennte Kerne üblich sind, werden bei Hoch- und Niederfrequenztransformatoren, sowohl bei Tonfrequenzübertragern als auch Netztransformatoren, beide Wicklungen auf einem gemeinsamen Eisenkern aufgetragen. Dieser, gegebenenfalls mit einem Luftspalt versehen, besteht aus lamelliertem Transformatorenblech oder, für die höheren Frequenzen des Tonbereichs, aus geschlossenen Masse- oder Ferritkernen. Nach der Kernform ist zwischen Kern-, Mantel- und Ringtransformatoren zu unterscheiden.

Legt man an die Primärwicklung des Transformators eine Wechselspannung, so wird in der Sekundärwicklung eine Spannung induziert, deren Frequenz mit der der zugeführten Spannung übereinstimmt. Die induzierte Spannung wird bestimmt von der magnetfeldabhängigen Kopplung, der Windungszahl und dem

Widerstand der Sekundärspule. Bei einer gegebenen Größe der Primärwicklung ist es also möglich, in der Sekundärwicklung eine — in gewissen Grenzen — beliebige Spannung zu erzeugen. Die Primärspannung kann herauf- oder heruntertransformiert werden; selbstverständlich ist auch eine Übertragung im Verhältnis 1 : 1 möglich. Die Leistung, die sekundärseitig abgenommen wird, ist durch die unvermeidlichen Verluste stets kleiner als die Leistung, die der Transformator auf der Primärseite aufnimmt. Als Verluste kommen im wesentlichen Kupfer- und Eisenverluste sowie Wirbelstromverluste in Betracht. Trotzdem verfügen Transformatoren über einen guten Wirkungsgrad (75 bis 98 % je nach Kerngröße). Der Abstand der beiden Wicklungen voneinander bestimmt den Kopplungsgrad (lose Kopplung, feste Kopplung) und die Größe der transformierten Spannung. Durch Anbringen beider Wicklungen auf einem gemeinsamen Eisenkern wird eine extrem feste Kopplung erreicht.

Unter der Voraussetzung einer ideal festen Kopplung beider Wicklungen (sie ist in der Praxis allerdings nicht zu verwirklichen), verhält sich die Primärspannung zur Sekundärspannung wie die zugehörigen Windungszahlen der Wicklungen; die Ströme verhalten sich umgekehrt wie die Windungszahlen:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{w_2}{w_1}; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{U_2}{U_1}.$$

Das Verhältnis der Windungszahlen wird als Übersetzungsverhältnis ü bezeichnet. Es entspricht dem Verhältnis der Spannungen und wird für den unbelasteten Transformator angegeben:

$$\frac{w_1}{w_2} = ü; \quad \frac{U_1}{U_2} = ü; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{ü}.$$

In der Praxis ist die wirksame Spannungsübersetzung kleiner, als es das Übersetzungsverhältnis angibt.

Die Transformation der Spannungen und Ströme kann auch als Widerstandstransformation aufgefaßt werden

(U : I = R !). Auf der Seite mit der größeren Windungszahl ist naturgemäß auch der größere Widerstand wirksam (größere Spannung, kleiner Strom). Der Widerstand wird dementsprechend mit dem Quadrat des Übersetzungsverhältnisses transformiert. Es gilt:

$$\frac{U_1}{I_1} = ü^2 \cdot \frac{U_2}{I_2}; \quad R_1 = ü^2 \cdot F_2;$$

$$ü^2 = \frac{R_1}{R_2}; \quad ü = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}}.$$

2.1 Hochfrequenztransformatoren, Hochfrequenzübertrager (siehe auch Seite 30)

Transformatoren für HF-Zwecke werden durch geeignete, miteinander gekoppelte HF-Spulen gebildet. Sie können getrennte oder gemeinsame Eisenkerne haben.

Kennzeichen, spezielle Eigenschaften, Anwendung

Das Merkmal des Hochfrequenztransformators ist eine feste Kopplung zwischen den beiden Wicklungen. Es werden daher geschlossene Kerne aus Material mit relativ großer Permeabilität verwendet. Beim Hochfrequenzübertrager steht das Übersetzungsverhältnis im Vordergrund. Die Kopplung der beiden Wicklungen ist in der Regel verhältnismäßig lose. Außer zur Übertragung von HF-Spannung von einem Stromkreis auf einen anderen wird dieses Bauelement zur Symmetrierung (Anpassung eines symmetrischen Systems an ein unsymmetrisches) gebraucht.

2.2 Niederfrequenztransformatoren

Niederfrequenztransformatoren arbeiten im Tonfrequenzbereich. Entsprechend der unterschiedlichen Anwendung dieses Bauelements ist eine Unter-

teilung in Tonfrequenztransformatoren und Tonfrequenzübertrager einerseits und Netzfrequenztransformatoren (Netztransformatoren) andererseits zweckmäßig.
Grundsätzlich gleichen sich beide Typen in bezug auf ihre Ausführungsform.
Der Niederfrequenztransformator ist durch eine sehr feste Kopplung gekennzeichnet, bei der die Mehrzahl der Kraftlinien auch die Sekundärwicklung durchsetzen. Diese Kopplung ist dadurch zu erzielen, daß beide Wicklungen dicht auf- beziehungsweise aneinanderliegen und ein die magnetische Kopplung der Wicklungen bewirkender, kräftiger Eisenkern verwendet wird.

Werkstoff und Ausführung der Wicklung — meist benutzt man Kupferlackdraht, gelegentlich auch lackisolierten Aluminiumdraht. Der Drahtquerschnitt wird durch die Stromstärke in Ampere (A) und die Stromdichte in Ampere je mm² (A/mm²) bestimmt. Dieser Wert stellt ein Kriterium für die Erwärmung eines Transformators dar.
Die untere Wicklung ist normalerweise die Primärwicklung, die obere die Sekundärwicklung. Für spezielle Zwecke wählt man eine „verschachtelte“ Wicklung, die sich durch geringe Streuung auszeichnet. Bei industrieller Fertigung auf Wickelautomaten wird lagenweise gewikkelt. Eine Wicklungs- und Lagenisolation erreicht man mit Lackpapier, Ölpapier, Ölseide oder Lackleinen. Um gegenseitige kapazitive Beeinflussungen zu verhindern, werden Primär- und Sekundärwicklung falls erforderlich durch eine dünne, nicht geschlossene Kupfer-, Messing- oder Aluminiumfolie oder eine ebenfalls offene Windungslage voneinander abgeschirmt. Die Schirmung ist an Masse zu legen.
Werkstoff und Ausführung des Wickelkörpers — Dieser besteht meist aus Hartpapier oder Preßspan. Bei Sonderausführungen von Tonfrequenztransformatoren sind auch aus Preßstoff (Bakelit) hergestellte Wickelkörper üblich.

Werkstoff und Ausführung des Kernes – Von einigen Ausnahmen abgesehen, wird für den Aufbau von Transformatorenkernen ein mit Silizium legiertes Eisenblech verwendet. Es besitzt hohe Magnetisierbarkeit und dementsprechend geringe Ummagnetisierungsverluste im magnetischen Wechselfeld. Diese bei der Magnetisierung auftretenden Verluste – gemessen in Watt pro Kilogramm (W/kg) – für Scheitelwerte der Induktionen von 10 000 und 15 000 G (Gauss = Einheit der magnetischen Feldstärke $\mathfrak{B}$) bei 50 Hz werden mit den Verlustzahlen V 10 und V 15 bezeichnet. (Die Bleche für Übertrager werden nicht nach den Ummagnetisierungsverlusten, sondern nach der mittleren wirksamen Permeabilität μ gekennzeichnet.)
Transformatorenblech (identisch mit Dynamoblech) wird nach TGL 2756, dem Siliziumgehalt und damit der Größe der Ummagnetisierungsverluste entsprechend, in 4 Klassen aufgeteilt:

	Verlustzahlen in W/kg	
	V 10	V 15
Sorte I normale Dynamobleche	3,6	8,5
Sorte II schwach legierte Bleche	3,0	7,2
Sorte III mittelstark legierte Bleche	2,6 bis 2,0	6,3 bis 4,9
Sorte IV hochlegierte Bleche	1,7 bis 1,0	4,0 bis 2,5

Bevorzugt werden für Transformatoren in funktechnischen Geräten Bleche der Sorten III und IV. Handelsübliche Bleche sind 0,35 und 0,5 mm dick.

Die Kernbleche werden aus dem in Streifen zugeschnittenen Material ausgestanzt. Da beim Aufbau des Kernes die einzelnen Bleche voneinander isoliert sein müssen, ist das Material künstlich oxydiert oder mit einem Lack- oder dünnen Papierüberzug versehen, sofern nicht schon die Zunderschicht der Bleche den Anforderungen genügt; dies ist im allgemeinen der Fall.

Magnetische Werkstoffe für Transformatoren, an die besondere Ansprüche in bezug auf die Permeabilität gestellt werden müssen, wie dies für einige Übertrager zutrifft, bestehen aus Eisen-Nickel-(Kupfer-)Legierungen. Solche Werkstoffe sind beispielsweise unter den Handelsnamen Permalloy und Mumetall bekannt. Der Hauptgrund für die gelegentliche Verwendung von Eisenpulver- (Masse-) oder Ferritkernen für Transformatoren beziehungsweise Übertrager, die im Gebiet der höheren Frequenzen des Tonbereichs arbeiten, liegt in der Möglichkeit, die Wirbelstromverluste im Kern stark herabzusetzen, ohne auf die Vorteile des lamellierten Eisenkerns zu verzichten. Für den Aufbau von Transformatoren für funktechnische Schaltungen sind folgende Kernblechschnitte gebräuchlich:

M-Schnitt,
E/I-Schnitt,
U/I-Schnitt.

Den M-Schnitt (Mantelschnitt) stanzt man aus einem Stück, wobei der Mittelsteg einseitig getrennt wird (Bild 31). Diese Trennung ist notwendig, um die Bleche in den Spulenkörper einschieben zu können. Eine Kürzung des Steges liefert einen gegebenenfalls erforderlichen Luftspalt, der je nach Kerngröße 0,3 —

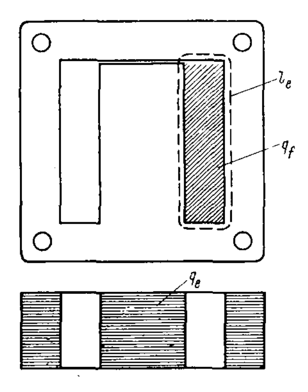


Bild 31
M-Blechschnitt für Einschenkelwicklung

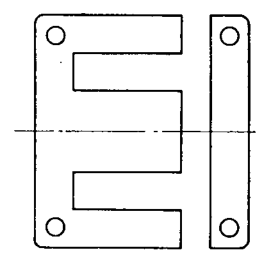


Bild 32
E/I-Blechschnitt für Einschenkelwicklung

0,5 — 1,0 oder 2,0 mm breit sein kann. Bei dem aus M-Schnitt-Blechen aufgebauten M-Kern (Mantelkern) ist nur der mittlere Schenkel bewickelt (Einschenkelwicklung); die äußeren Schenkel stellen gemeinsam mit den stirnseitigen Jochen einen geschlossenen Mantel dar. Der Einfluß der Trennung kann durch wechselseitige Schichtung der Bleche ausgeschaltet werden.
In den Tabellen der Schnitte gibt der Buchstabe deren Form und die Zahl die größte Abmessung an, zum Beispiel M 42 = M-Schnitt, Größe 42 mm.

Die wichtigsten Maße des Eisenkernes sind:

mittlerer Kernquerschnitt q (in cm),
mittlere Eisenweglänge l_e (in cm),
mittlerer Fensterquerschnitt q_f (in cm).

Der E/I-Schnitt (Bild 32) wird dadurch gekennzeichnet, daß das Joch aus einem getrennten I-förmigen Blech besteht, das an das „E“ als Dreischenkelteil angesetzt ist. Fertigungsmäßig erweist sich dieser wie auch der folgende Schnitt als sehr ökonomisch, weil sich beim Stanzen die geringsten Materialabfälle ergeben; aus 2 E-Schnitten fallen 2 I-Bleche für das Joch heraus. Das „Stopfen“ des Transformators ist unkompliziert, weil — im Gegensatz zum M-Schnitt — die Bleche unmittelbar zu einem Paket zusammengefügt werden können. Bei wechselseitigem Schichten entsteht ein luftspaltloser Kern, bei gleichschichtigem wird durch Einfügen eines Streifens aus isolierfähigem Material zwischen Schenkeln und Joch ein Luftspalt hergestellt.

Der aus E/I-Kernen gefertigte Transformator ist wie die oben besprochene Ausführung ein Manteltransformator, trägt also nur e i n e n Spulenkörper.

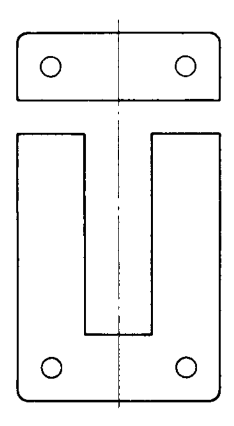


Bild 33
U/I-Blechschnitt für Ein- und Zweischenkelwicklung

Der U/I-Schnitt (Bild 33), für den hinsichtlich des Aufbaues im wesentlichen das gilt, was für den E/I-Schnitt gesagt wurde, erlaubt sowohl die Einschenkel- als auch die Zweischenkelwicklung. Diese Ausführung kennzeichnet den Kerntransformator. Da das Eisen über eine größere Länge von der Kupferwicklung umgeben ist, hat dieser Transformator ein äußerst geringes Streufeld. Der Wicklungsaufbau muß allerdings völlig symmetrisch erfolgen.

2.21 Tonfrequenzübertrager

Von ihnen muß verlangt werden, daß sie im gesamten Tonfrequenzband (etwa 30 bis 16 000 Hz) zumindest annähernd linear arbeiten und somit den zu übertragenden Frequenzbereich unverzerrt wiedergeben. Diese Bedingung ist im wesentlichen durch richtige Wahl der Primärinduktivität und einen den Anforderungen entsprechenden Aufbau der Wicklungen zu erfüllen. Es

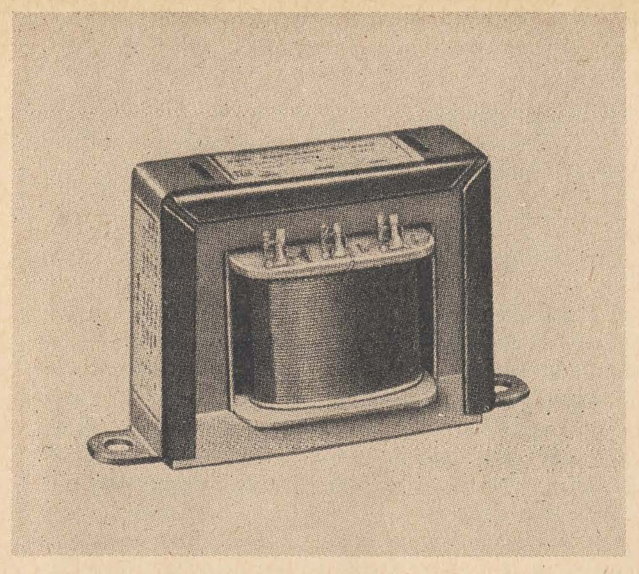


Bild 34 Anpassungstransformator

sind einerseits große Primärwindungszahlen und Eisenkerne notwendig, die bei den relativ hohen Strombelastungen noch nicht gesättigt werden dürfen, andererseits erweisen sich kapazitätsarme Wicklungsarten (z. B. Kammerwicklung, Kreuzwicklung) mit minimaler Streuinduktivität (z. B. Verschachtelung von Teilwicklungen der Primär- und Sekundärwicklung) als zweckmäßig.

Neben einer Transformation der Spannung hat in vielen Tonfrequenzschaltungen die Widerstandsübersetzung Bedeutung. Hier ist ein zur Anpassung an die (primäre) Spannungs- beziehungsweise Stromquelle gegebener Widerstandswert auf einen anderen, sekundärseitig benötigten Widerstandswert zu transformieren.

Dieser Transformator wird Anpassungsübertrager oder Anpassungstransformator genannt (Bild 34).

Für die Widerstandstransformation gilt:

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{R_1}{R_2}};$$

R_1 = eingangsseitiger (primärer) Anpassungswiderstand = Generatorwiderstand, R_2 = ausgangsseitiger (sekundärer) Belastungswiderstand.

Anwendung

a) Eingangsübertrager — Diesem Übertrager wird primärseitig die Eingangsspannung zugeführt; er ist also sekundärseitig mit dem eigentlichen Eingang des Gerätes verbunden. Der Scheinwiderstand eines Wechselstromgenerators wird an den Niederfrequenz-Eingangskreis des Gerätes angepaßt. In der Regel sind diese Übertrager nicht durch Gleichstrom vorbelastet.
Im wesentlichen findet der Eingangsübertrager bei der Mikrofon-Anpassung und Modulations-Übertragung Verwendung. Im Mikrofonkreis hat der Mikrofon-Übertrager die Aufgabe, die geringe Mikrofon-Wechsel-Spannung hochzutransformieren und den Innenwiderstand des Mikrofons an den Verstärkereingang anzupassen. Für sehr niederohmige Mikrofone ist bei Musikübertragungen ein Übersetzungsverhältnis von etwa 1:20, bei Sprachwiedergabe von ungefähr 1:40 üblich.
Der Modulations-Übertrager hat dem Sender die Modulation zuzuführen. Die von einem Mikrofon, Tonabnehmer oder Tonbandgerät abgegebene NF-Spannung muß sowohl unverzerrt als auch mit dem gewünschten Frequenzumfang übertragen werden. Diese Bedingungen erfordern einen sachgemäßen Aufbau des nicht handelsüblichen Transformators.*) Der mehr oder weniger starken Gleichstromvormagnetisierung des Kernes durch den Anodengleichstrom der PA-Röhre

* In der Fachliteratur finden sich geeignete Berechnungs- und Konstruktionsunterlagen, zum Beispiel „funkamateur", 1958, H. 5, S. 8.

wird bei Eintaktschaltungen mit einem Luftspalt begegnet; bei Gegentaktübertragern entfällt er, weil sich die Magnetfelder der Primärspulen infolge des gegensinnigen Stromflusses aufheben. Das Übersetzungsverhältnis des Modulations-Übertragers ist klein. Es wird sowohl von der Modulationsart als auch von den Röhren- und Betriebsdaten bestimmt.

b) Ausgangsübertrager — Dieses Bauelement hat folgende Funktionen zu erfüllen:

Spannungstransformation;

galvanische Trennung des (sekundären) Lastkreises von dem vorausgehenden (primären) Schaltungsteil, der eine mit Wechselspannung überlagerte Gleichspannung führt;

Widerstandsanpassung, zum Beispiel Anpassung des niederohmigen Widerstandes der Schwingspule des dynamischen Lautsprechers an den hohen Außenwiderstand der Endröhre;

in Gegentaktstufen den Übergang von der Gegentaktschaltung auf die im Eintakt geschaltete Belastung zu vermitteln.

Der Übertrager übersetzt den sekundärseitig angeschlossenen Nutzwiderstand R_2 mit dem Quadrat des Windungsverhältnisses:

$$R_1 = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 \cdot R_2 = ü^2 \cdot R_2; \; R_2 = \frac{R_1}{ü^2}$$ (siehe auch Seite 49).

Das Übersetzungsverhältnis ist durch den Außenwiderstand der Endröhre und die Größe des Schwingspulenwiderstands gegeben. Nach der oben angegebenen Formel zur Widerstandstransformation ist im folgenden ein Beispiel gegeben:

Außenwiderstand der Endröhre	7000 Ohm
Widerstand der Schwingspule	4,4 Ohm

Übersetzungsverhältnis $ü = \sqrt{\frac{7000}{4,4}} = 40:1.$

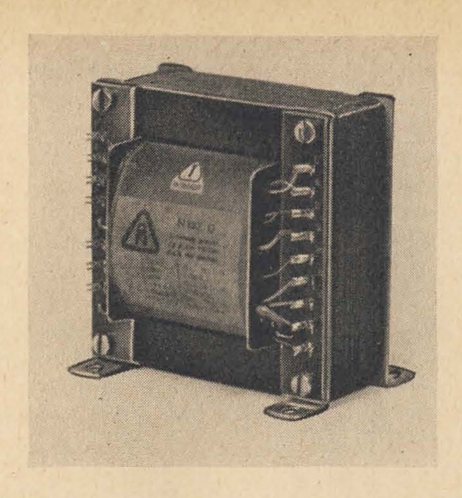
Von der Größe der Induktivität der Primärwicklung, die durch die Windungszahl und den Kernquerschnitt bestimmt wird, hängt die Übertragung der unteren Frequenzen (tiefen Töne) ab.
Zum Aufbau von Ausgangsübertragern werden meist E/I-Kerne verwendet. Da auch bei diesem Übertrager die Primärspule gleichstrombelastet ist (Anodenstrom der Endröhre) und damit eine Vormagnetisierung des Kernes eintritt, wird, um Verzerrungen zu vermeiden, ein Eisenkern mit Luftspalt erforderlich.

c) Zwischenübertrager — Dieser paßt den Anodenkreis einer (Vor-) Röhre an den Gitterkreis der nachfolgenden Röhre an. Da „transformatorgekoppelte" Röhren-NF-Verstärker wegen des schlechten Frequenzgangs kaum noch verwendet werden, hat der Zwischenübertrager nicht mehr seine ursprüngliche Bedeutung. Heute wird er als Treibertransformator in Röhren-Gegentaktendstufen und in Transistorempfängern verwendet. Hier untersetzt er den Lastwiderstand — einige 1000 Ohm — des Treibertransistors auf den niederohmigen Basiskreis der allgemein im Gegentakt geschalteten Endstufe.

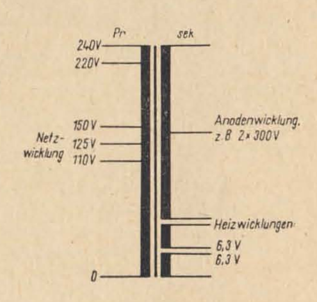
2.22 Netztransformatoren

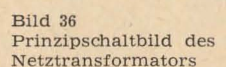
Im Gegensatz zum Übertrager arbeitet der Netztransformator (Bild 35) bei einer festen Frequenz, nämlich der des Energieversorgungsnetzes (50 Hz, in Amerika 60 Hz).
Er hat die Aufgabe, die Netzwechselspannung (220, 125 oder 110 V, in Ausnahmefällen 150 oder 240 V) auf die vom Verbraucher benötigte(n) Spannung(en) umzuspannen, das heißt herauf- oder herabzutransformieren. Von einer besonderen Bauart abgesehen, trennt der Netztransformator gleichzeitig den Verbraucher vom Stromnetz.
Die Primärwicklung ist meist mit Anzapfungen für verschiedene Netzspannungswerte versehen; bei Netz-

Bild 35
Netztransformator



transformatoren normaler Ausführungen sind, je nach Bedarf, 2 oder 3 Sekundärwicklungen vorhanden (Bild 36). Die unterste, unmittelbar auf dem Spulenkörper aufgetragene Wicklung ist die Primärwicklung; auf dieser liegt, als erste Sekundärwicklung, die Anodenwicklung, die bei Doppelweg-Gleichrichterschaltungen als Gegentaktwicklung in Hälften aufgeteilt ist. Die Heizwicklung(en) für die Empfängerröhren und eventuell die Gleichrichterröhre bilden im allgemeinen die oberen Lagen. Sofern die Röhrenheizung einpolig an




Bild 36
Prinzipschaltbild des Netztransformators

Masse liegt, kann die Heizwicklung als gleichzeitige Abschirmung zwischen Primär- und Sekundärwicklungen gelegt werden. Die Wicklungen sind durch Isolierleinen oder mehrere Lagen Lack- oder Ölpapier voneinander isoliert; außerdem ist in den meisten Fällen eine Lagenisolation innerhalb der Wicklungen notwendig (Bild 37).
Netztransformatoren sind vorwiegend mit M-Kernen, gelegentlich auch mit E/I-Kernen aufgebaut. Diese Kerne haben k e i n e n Luftspalt, da eine Gleichstrombelastung der Wicklung nicht vorhanden ist.
Eine von der obigen Bauart abweichende Konstruktion weist der S p a r t r a n s f o r m a t o r oder A u t o - t r a n s f o r m a t o r auf. Er ist gekennzeichnet durch

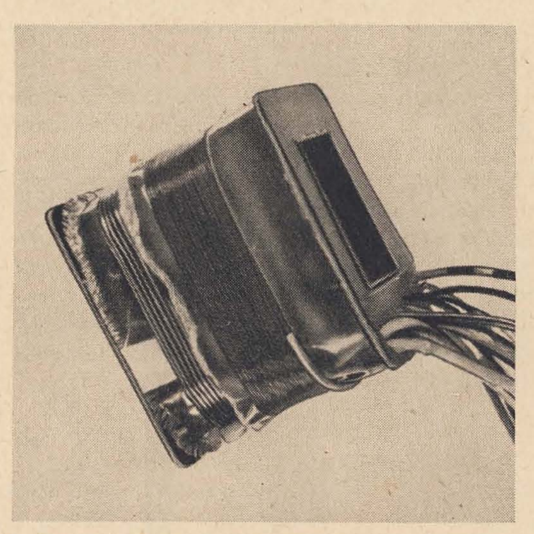


Bild 37 Bewickelter Spulenkörper eines Netztransformators; Deckisolation und Zwischenisolation (teilweise) entfernt. Wicklungsteil links = Heizwicklung für die Empfängerröhren und Skalenlampen, Wicklung in der Mitte = Heizwicklung für die Gleichrichterröhre; Wickelkörper in Schachtelbauweise

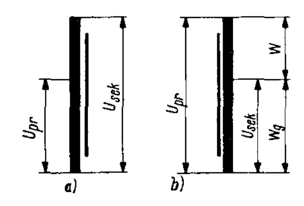


Bild 38
Schema des Spartransformators; a) Primärspannung kleiner als Sekundärspannung, b) Primärspannung größer als Sekundärspannung

eine für Eingang und Ausgang gemeinsame Wicklung, von der ein Teil sowohl dem Primär- als auch dem Sekundärkreis angehört. Eine galvanische Trennung vom Stromnetz erfolgt also n i c h t. Die Wicklung hat eine oder mehrere Anzapfungen, wobei die Spannung jeweils zwischen einem Wicklungsende und der Anzapfung angelegt beziehungsweise abgegriffen wird (Bild 38).

Da ein Teil der Primärwicklung des Spartransformators auch als ein Teil der Sekundärwicklung benutzt wird, tritt eine extrem feste Kopplung auf. Dieser Umstand ermöglicht einen sparsamen Aufbau (dünner Draht, somit geringeren Winkelraum und auch kleineren Eisenkern).

Die Vorteile gehen allerdings verloren, wenn das Verhältnis der beiden Spannungen größer als 3 : 1 wird.

Anwendung

Über den Netztransformator stehen funktechnische Geräte — Sender, Empfänger, Fernsehgeräte, Verstärker, Meßgeräte — mit dem Stromnetz in Verbindung; im allgemeinen ist er ein Bestandteil der betreffenden Geräte. Ferner dient das Bauelement als Trenntransformator (Schutztransformator) — hiervon ist selbstverständlich der Spartransformator ausgenommen — sowie als Regeltransformator, gegebenenfalls zur Konstanthaltung der Netzspannung.

Bild 39 zeigt die Schaltung eines solchen Regeltransformators mit Spartransformator.

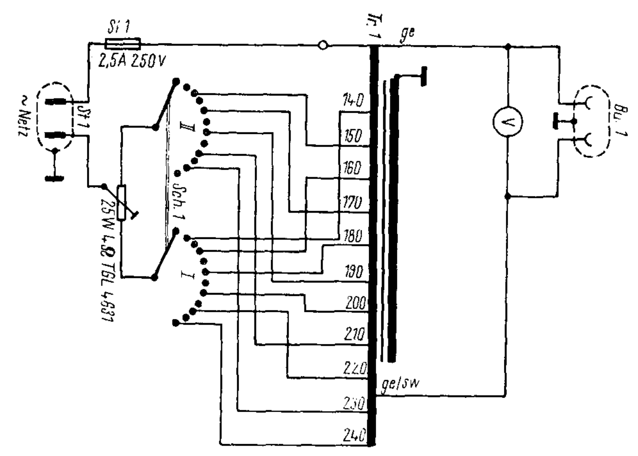


Bild 39 Spartransformator im Netzspannungsregler

Standardisierung, Normung

Kleintransformatoren, Übertrager, Drosseln

Spulenkörper, gespritzt oder gepreßt (Maße, Material) für E/I-, U/I-, L,- LL-, SU-Kerne — TGL 9870

Spulenkörper aus Hartpapier in Schachtelbauweise (Abmessungen, Ausführung) für M-, E/I-, U/I-, SM-, LL-Kerne — TGL 0—41304

Kernbleche: Größen für Kerne aus gestanzten Blechen (Übersicht) — TGL 3015—56

Kernbleche: Abmessungen, Werkstoffe — TGL 0—41302

Transformatorenbleche (techn. Lieferbedingungen) — TGL 27 56 7 : 1

Werkstücke aus oxydkeramischen Werkstoffen

U-, E-, I-. L-Kern (Begriffe) — TGL 13094

U-, E-, I-Kerne (Maße, Material) — TGL 4819, 4820

3. HALBLEITERBAUELEMENTE

Der wesentliche Bestandteil dieser Bauelemente sind Halbleiter, das heißt feste, kristalline Stoffe, deren Leitfähigkeit eine Zwischenstellung zwischen der metallischer Leiter und der von (idealen) Nichtleitern einnimmt.

Im Zusammenhang mit unseren Betrachtungen interessieren nur die Elektronenhalbleiter, bei denen (wie in Metallen) Elektronen die elektrische Leitung übernehmen. Halbleiter mit Ionenleitung bleiben im Rahmen der Ausführungen unberücksichtigt.

Der sehr komplizierte Leitungsmechanismus des Halbleiters wird im folgenden nur kurz umrissen, da hierüber eine Vielzahl von Veröffentlichungen Aufschluß gibt (siehe auch „Der praktische Funkamateur“ Band 34). Dem in die Materie einführenden folgenden Abschnitt sind vorzugsweise die Verhältnisse im Kristallgleichrichter zugrunde gelegt, da nur aus diesen die wesentlichen Züge eines Halbleiters klar hervorgehen.

Bei Elementen mit Halbleitereigenschaften sind 2 verschiedene Arten von Ladungsträgern am Zustandekommen eines Stromes beteiligt: einmal die normalen Elektronen mit negativer (n-)Ladung, zum anderen positive (p-)Ladungsträger. Diese physikalisch nicht realen Defektelektronen, allgemein als „Löcher“ bezeichnet, bilden Störstellen im molekularen Gefüge der Materie. Löcher sind von Elektronen nicht besetzt, können sich aber, analog den Elektronen, als ein Strom in entgegengesetzter Richtung (+) durch den Halbleiterkristall bewegen. Sowohl die Elektronen- als auch die Defektelektronen-Leitfähigkeit wird durch Zugabe bestimmter Elemente bedeutend gesteigert. Derart „dotierte“ oder „gedopte“ Halbleiter werden entweder vor-

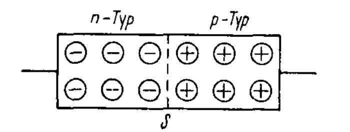


Bild 40
Die Ladungsverteilung im Halbleiter (schematisch); n = Elektronenüberschuß, p = Defektelektronenüberschuß, S = Sperrschicht

wiegend elektronen- oder löcherleitend. Im ersteren Fall handelt es sich um einen Elektronen- oder n-Leiter, im anderen um einen Löcher- oder p-Leiter. In einem Kristallstück können beide Leitungsmechanismen, scharf aneinandergrenzend, erzeugt und ein pn-Übergang, die Grenz- oder Sperrschicht, aufgebaut werden (Bild 40). Entsprechend dem Systemaufbau des Halbleiter-Gleichrichterelements (Spitzen- oder Flächenkontakt-System) beruht die Herstellung auf Diffusions- und Legierungsvorgängen oder auf einer im Ziehverfahren herbeigeführten unterschiedlichen Dotierung (Gegendotierung) des Halbleitermaterials. Das Anbringen einer zweiten Sperrschicht führt zur Ausbildung einer weiteren Leitfähigkeitszone, so daß sich eine p-n-p- beziehungsweise n-p-n-Leitung ergibt. Unter bestimmten Voraussetzungen erlaubt dieses System eine Stromsteuerung und Verstärkung.
Die wichtigsten Materialien für Halbleiterbauelemente sind: Selen, Kupferoxydul, Germanium, Silizium und Oxydkeramik. Bei Oxydkeramik hat die Eigenleitung, die im Gegensatz zu dem Verhalten der Metalle mit steigender Temperatur anwächst, besondere Bedeutung. Die vorerwähnten Materialien werden für den Aufbau von Selen- und Kupferoxydul-Gleichrichtern, Germanium- und Silizium-Kristalldioden und -verstärkern (Transistoren) sowie selbsttätigen Regelwiderständen, den Thermistoren (Heißleitern) und Varistoren, verwendet. (Diese beiden Bauelemente wurden bereits im Band 23 der Broschürenreihe „Der praktische Funkamateur“ besprochen.)

3.1 Halbleitergleichrichter

Als kennzeichnend für dieses zur Gleichrichtung von hoch- oder niederfrequenten Wechselströmen dienenden Bauelements kann eine innerhalb des Halbleitermaterials erzeugte Sperrschicht gelten, die an die Ventilwirkung gebunden ist. Die Kennwerte der Halbleitergleichrichter sind spannungs- und temperaturabhängig; der Widerstand hängt von Richtung und Größe der angelegten Spannung ab.

Die Stromrichtung, in der der kleinere Widerstand vorhanden ist, heißt Durchlaßrichtung, die Stromrichtung, in der der größere Widerstand wirkt, Sperrrichtung. Eine an den Gleichrichter angelegte Wechselspannung wird in der einen Halbwelle (nahezu) ungehindert durchgelassen und in der anderen (nahezu) gesperrt.

Die wesentlichen Definitionen werden im folgenden gegeben:

Gleichrichterströme:

Der Durchlaßstrom ist der Strom, der bei an den Anschlüssen des Gleichrichters liegender Durchlaßspannung durch den Gleichrichter fließt.

Der maximale Durchlaßstrom ist der höchstzulässige Effektivwert des Durchlaßstroms.

Der maximale Spitzenstrom ist der höchstzulässige Spitzenwert des Durchlaßstroms bei gegebenen Zeitverhältnissen.

Sperrstrom heißt der Strom, der bei einer an den Anschlüssen des Gleichrichters liegenden Sperrspannung durch den Gleichrichter fließt.

Gleichrichterspannungen:

Als Durchlaßspannung wird der Spannungsabfall bezeichnet, der bei Fließen des Durchlaßstroms über den Anschlüssen des Gleichrichters auftritt.

Die maximale Spitzenspannung ist der höchstzulässige Augenblickswert der Spannung, die in Sperrichtung am Gleichrichter liegen darf.
Als Sperrspannung wird der Spannungsabfall bezeichnet, der bei einem bestimmten Sperrstrom an den Anschlüssen des Gleichrichters auftritt.
Die maximale Sperrspannung ist die höchstzulässige Spannung in Sperrichtung, die dauernd am Gleichrichter liegen darf.

Widerstände:

Der Durchlaßwiderstand ist der Gleichstromwiderstand in Durchlaßrichtung. Er hängt ab von dem den Gleichrichter durchfließenden Strom.
Der Sperrwiderstand ist der Gleichstromwiderstand in Sperrichtung. Er hängt ab von der an den Gleichrichter angelegten Spannung.
Bild 41 zeigt das Schaltsymbol für den Halbleitergleichrichter.

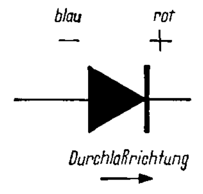


Bild 41
Schaltsymbol für den Halbleitergleichrichter mit Kennzeichnung der Polung und Stromrichtung

3.11 Trockengleichrichter

Dieses Bauelement besteht aus einem Halbleiter, dessen beide Flächen mit einem Metall kontaktieren. An einer der Berührungsflächen befindet sich die Sperrschicht; sie bestimmt im wesentlichen die elektrischen Eigenschaften des Gleichrichters. Der Trockengleichrichter gehört also zur Klasse der Sperrschichtgleichrichter.

In der Funktechnik ist der Selengleichrichter von großer Bedeutung; der Kupferoxydulgleichrichter wird nur noch in bestimmten Fällen verwendet.

3.111 Selengleichrichter

Diese Ausführung besteht aus einer Grundplatte (Trägerelektrode), einer Halbleiterschicht und einer Deckelektrode (Bild 42). Als Material für die Grundplatte dient mit einer dünnen Wismutschicht überzogenes Aluminium. Auf dieser Schicht ist der Halbleiterstoff Selen aufgetragen. Die aus einem bei niedriger Temperatur schmelzenden, cadmiumhaltigen Lot bestehende Deckelektrode ist auf die Selenschicht aufgespritzt. Zwischen dieser und der Deckelektrode bildet sich die Sperrschicht.



Bild 42
Aufbau des Selengleichrichters (schematisch); a) Grundplatte, b) Halbleiterschicht, c) Sperrschicht, d) Deckelektrode

Für höhere Spannungen werden die als Elemente bezeichneten einzelnen Platten zu Säulen zusammengesetzt (kleinere Plattengrößen, bis 10 mm ∅, sind in Hülsen untergebracht). Beim Säulenaufbau sind die Gleichrichterscheiben auf isolierte Bolzen aufgereiht. An den Scheiben unmittelbar anliegende Metallplatten sorgen für die Wärmeableitung, Abstandsringe gewähren der Luft freien Zutritt. Die einzelnen Elemente werden durch sternförmige Bronzekontaktfedern auf einem für die Gleichrichterwirkung günstigen Druck gehalten. In Form von kleinen Fahnen werden die Anschlüsse hergestellt; die blau markierte Fahne kennzeichnet den negativen Gleichstromanschluß, die rot markierte den positiven. Ein zum Beispiel beim Graetz-Gleichrichter vorhandener Wechselstromanschluß ist mit einer gelben Markierung versehen. Bild 43 zeigt den Aufbau von 2 Selengleichrichtersäulen.

Die Pole nicht gekennzeichneter Trockengleichrichter können durch einfache Widerstandsmessung bestimmt werden. Im übrigen stellt beim Selengleichrichter die Kontaktfeder den Pluspol dar. Für eine gewünschte Strombelastung kann aus einer Reihe von Elementen mit Plattengrößen von 5 mm ∅ bis 300 · 300 mm gewählt werden. Durch Parallelschaltung von Gleichrichtersäulen ist es möglich, Bauelemente für höchste Strombelastungen aufzubauen.
Die Übersicht im Anhang gibt die Betriebswerte für in der Funktechnik verwendete Typen an. Das Verhältnis der Widerstände $R_{Durchlaßrichtung} : R_{Sperrichtung}$ gilt als Maß für die Güte des Gleichrichters. Das Kriterium für das Verhalten eines Gleichrichters ist seine Kennlinie, aus der die interessierenden Stromwerte in Abhängigkeit von der angelegten Spannung hervorgehen. Die Kennlinie für eine Selengleichrichterscheibe von 1 cm^2 Fläche wird in Bild 44 wiedergegeben. Sie veranschaulicht, daß beispielsweise bei einer Spannung von 0,8 V in der Durchlaßrichtung ein Strom von 80 mA fließt, während in der Sperrichtung bei dieser

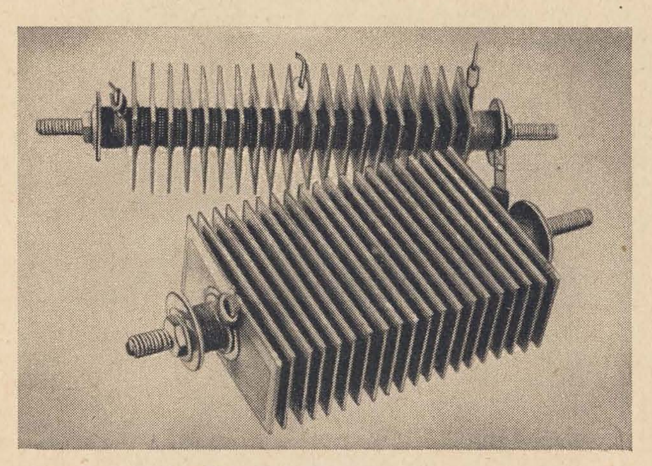
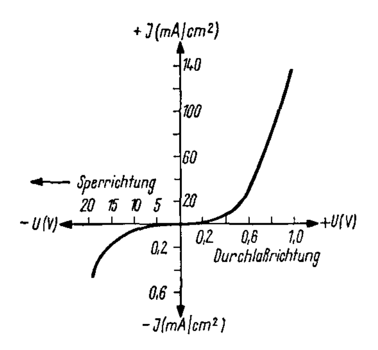


Bild 43 Selengleichrichtersäulen

Bild 44
Statische Kennlinie für ein Selengleichrichterelement mit 1 cm² Fläche



Spannung nur ein Strom von einigen μA zustande kommt. Ferner läßt das Diagramm erkennen, daß die Güte eines Selengleichrichters nicht über den gesamten Kennlinienbereich konstant ist.
An einem Trockengleichrichter darf nur eine bestimmte maximale Spannung liegen. Diese als Sperrspannung bezeichnete Größe ist die effektive Wechselspannung, mit der eine Platte des Gleichrichters dauernd belastet werden kann (Effektivwert der Wechselspannung = Scheitelwert : $\sqrt{2}$ = Scheitelwert · 0,707). Wird die Sperrspannung überschritten, so treten Rückströme auf, die eine unzulässig hohe Erwärmung des Gleichrichters hervorrufen. Diese kann natürlich zu seiner Zerstörung führen.
Die Sperrspannung beträgt bei normalen Selengleichrichtern 20 bis 30 V eff. je Platte.
Der höchstzulässige Gleichstrom, den ein Gleichrichter dauernd abgeben kann, ist der – belastungsabhängige – Nenngleichstrom. Sowohl Spannungs- als auch Strombelastung sind durch die Erwärmung begrenzt. Die Gleichrichterwerte gelten daher für eine begrenzte Temperatur, nämlich eine Umgebungstemperatur von + 35 °C. Bei höheren Temperaturen dürfen Selengleichrichter nur mit entsprechend geringerer Last beansprucht werden. Keinesfalls darf die Temperatur der Platten + 75 °C übersteigen. Um die Erwärmung her-

abzusetzen, sollen die Platten senkrecht stehen; ferner ist für gute Entlüftung des Gehäuses zu sorgen. Selbstverständlich ist auch der Einbau des Selengleichrichters in unmittelbarer Nähe wärmeabstrahlender Bauelemente, wie Netztransformatoren, hochbelasteter Widerstände oder Endröhren, zu vermeiden. Kurzzeitige Überlastungen oder Kurzschlüsse werden, da der Temperaturanstieg im Gleichrichter nur träge erfolgt, im allgemeinen vertragen, nicht aber Überspannungen. Durchschläge führen zur Zerstörung der Sperrschicht.
Bei Normallast liegt der – belastungsabhängige – Wirkungsgrad moderner Selengleichrichter bei etwa 90 %; er zeigt sich also wesentlich günstiger als der von Hochvakuum-Gleichrichterröhren. Die Lebensdauer ist beachtlich. Selengleichrichter zeigen bei normaler Beanspruchung nach einer Betriebszeit von 2500 Stunden keine Verschlechterung des Wirkungsgrads.
Da der kapazitive Einfluß der Sperrschicht mit steigender Frequenz eine Abnahme der Gleichrichterwirkung bedingt, sind Selengleichrichter nur für die Gleichrichtung niedriger Frequenzen geeignet.

Typenbezeichnung

Sie ist auf einer der Deckplatten aufgedruckt und kennzeichnet die Gleichrichterschaltung, die maximale Wechselstrombelastung, die Nenngleichspannung und den Nenngleichstrom. Beispiel: B 220/160 – 0,3. B = Brückenschaltung (Graetzschaltung), 220 V eff. Wechselspannung, 160 V Nenngleichspannung und 0,3 A Nenngleichstrom.

Standardisierung, Normung

Halbleiter-Trockengleichrichter (Kennzeichnung)	TGL 13443
Selengleichrichter (Plattengrößen, Einbaulängen)	TGL 12221

Selengleichrichter (techn. Lieferbedingungen)	TGL	4521
Selen-Flächengleichrichter in Metallgehäusen	TGL	11773

Anwendung des Selengleichrichters in Gleichrichterschaltungen

a) Einwegschaltung – Bei dieser Schaltung wird nur eine Halbwelle der Wechselspannung ausgenutzt, so daß der Strom nur in einer Richtung fließt. Demzufolge ist die 50-Hz-Brummspannung groß. Die Schaltung bietet den Vorteil, daß der Netztransformator entfallen kann (Bild 45a). Eine direkte Verbindung mit dem Energieversorgungsnetz ist dann zulässig, wenn die Gleichspannung ausreicht und der Allstromcharakter dieser Schaltung nicht stört.

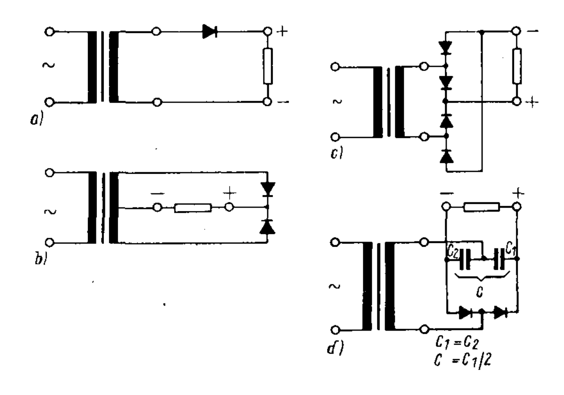


Bild 45 Schaltungen mit Selengleichrichtern, a) Einwegschaltung, b) Zweiweg-(Gegentakt-)Schaltung, c) Brücken-(Graetz-)Schaltung, d) Spannungsverdoppler-(Delon-Greinacher-)Schaltung

b) Zweiweg-(Gegentakt-)Schaltung — Es werden beide Halbwellen des Wechselstroms ausgenutzt. Somit beträgt die Frequenz der — gegenüber a) geringeren — Brummspannung 100 Hz. Zum Aufbau der Schaltung sind 2 Gleichrichtersäulen oder 1 entsprechend geschichtete Säule notwendig. Auf einen Transformator kann nicht verzichtet werden, da der Minuspol nur über eine Mittelanzapfung der Sekundärwicklung verfügbar ist (Bild 45b).

c) Brücken-(Graetz-)Schaltung — Sie wirkt wie die Schaltung b), hat ihr gegenüber aber den Vorzug, daß die Netzspannung unmittelbar gleichgerichtet werden kann. Bei Verwendung eines Netztransformators wird nur e i n e Sekundärwicklung benötigt. Es sind 4 Säulen beziehungsweise entsprechend geschichtete Gleichrichterelemente erforderlich. Wirkungsgrad und Brummfrequenz gemäß der Schaltung b) (Bild 45c).

d) Delon - Greinacher - (Spannungsverdoppler-)Schaltung — Es kann eine Gleichspannung entnommen werden, die 50 bis 100 % höher liegt als die angelegte Wechselspannung. Die Schaltung ist als eine Reihenschaltung zweier Einphasengleichrichter mit Ladekondensator aufzufassen; die positive Halbwelle lädt den einen, die negative den anderen Kondensator auf. Da, vom Verbraucher aus gesehen, die Kondensatoren in Reihe liegen, addieren sich ihre Teilspannungen. Im Leerlauf liegt zwischen plus und minus die doppelte Transformatorenspannung, die mit zunehmender Belastung stark abfällt (Bild 45d). Aus diesem Grunde hat die Delon-Schaltung in der Funktechnik keine große Bedeutung. Die Welligkeitsfrequenz beträgt 100 Hz.

Selengleichrichter werden als Bauelemente im Netzanschlußteil beispielsweise von Empfängern, Sendern, Verstärkern, Fernsehgeräten, Meßgeräten verwendet, vorwiegend in Anoden-, bisweilen auch in Heizkreisen. Ferner kann dieser Gleichrichter auch als Überlastungsschutz für Meßinstrumente dienen (diese Anwendungsmöglichkeit ist wenig bekannt).

3.112 Kupferoxydulgleichrichter

Die Trägerelektrode ist eine Kupferscheibe, auf der eine kristalline Schicht aus Kupferoxydul erzeugt wird. Die Deckelektrode besteht, je nach Bauart, aus einem Graphitniederschlag oder einer im Metallspritzverfahren aufgetragenen Zinklegierung. Die Sperrschicht befindet sich in der Übergangszone zwischen der Kupferplatte und dem Kupferoxydul. Im Gegensatz zum Selengleichrichter wird hier die Deckelektrode kontaktiert; sie ist „sperrfrei", das heißt, es darf keine Sperrschicht auftreten.

Die Wirkungsweise entspricht der des Selengleichrichters. Die belastungsabhängigen Sperrspannungen liegen für ein Element mit der Scheibengröße 20 mm ∅ zwischen 5 V bei 0,2 A und 15 V bei 0,05 A; die effektive Durchschlagsspannung liegt bei 35 V und die effektive Sperrspannung zwischen 5 und 8 V. Die maximal zulässige Betriebstemperatur beträgt 60 °C. Vor- und Rückstrom sind stark temperaturabhängig; bei einer Temperaturerhöhung von 25 auf 50 °C verstärkt sich der Vorstrom um etwa 25 %, der Rückstrom um mehr als 100 %.

Die Einzelelemente werden sowohl bei der älteren Druckplatten- als auch der modernen Freiflächenbauart zu Säulen vereinigt.

Besondere Formen stellen die Klein- und Kleinstgleichrichter dar. Die pillen- oder scheibenförmigen Elemente von 2 bis 7 mm ∅ sind, unter Einfügung einer Druckfeder, in ein Isolierrohr eingelassen, das mit Schraubkappen verschlossen ist, die gleichzeitig zur Stromzuführung dienen.

Für die Netzgleichrichtung sind in funktechnischen Schaltungen Kupferoxydulgleichrichter wenig gebräuchlich. Indessen finden die Kleinformen ein größeres Anwendungsgebiet. Sie dienen als Meßgleichrichter für Nieder- und Mittelfrequenzströme (eine besondere Bauform ist der in Vielfachmeßinstrumenten eingebaute

„Maikäfer"), als Modulator und, in Brückenschaltung aufgebaut, als Ringmodulator. Der unter dem Handelsnamen „Sirutor" bekannte Kleinstgleichrichter ist als Detektor geeignet, jedoch heute veraltet und von der Germaniumdiode abgelöst.

3.12 Kristallgleichrichter, Kristalldioden

Der Kristallgleichrichter ist eine verbesserte Form des ursprünglichen Kristalldetektors. In den ersten Funkempfängern bewirkte er die HF-Gleichrichtung (Demodulation) der von einem Sender ausgestrahlten modulierten Schwingungen. Während für den Detektor in der Natur als Mineral vorkommendes halbleitendes Material diente, werden für die moderne Kristalldiode speziell bearbeitetes Germanium oder Silizium verwendet. Die polykristalline Struktur wird nach Reinigung des Materials von Fremdatomen in eine monokristalline übergeführt. Der Einkristall erhält einen Zusatz von 3- beziehungsweise 5wertigen Fremdatomen (1 Fremdatom auf 10^8 bis 10^{10} [!] Atome des Grundmaterials). Das dotierte Material wird in winzige Plättchen aufgeteilt; diese bilden dann den wesentlichen Bestandteil der Kristalldiode.

Obwohl der Aufbau der Kristalldiode verhältnismäßig einfach ist, gestaltet sich die Technologie äußerst schwierig. Es wird unter anderem größte Präzision verlangt, was wegen der Kleinheit des Bauelements keine geringe Anforderung bedeutet.

In bezug auf den Anwendungszweck sind an den Kristallgleichrichter folgende Forderungen zu stellen: hohe mechanische Stabilität — hohe Sperrspannung — große Kennliniensteilheit — konstante Kennlinienkrümmung — Temperaturfestigkeit — kleine Temperaturkoeffizienten — weitgehende Frequenzunabhängigkeit — geringes Eigenrauschen — Konstanz der Kennwerte — hoher Wirkungsgrad — lange Lebensdauer.

Diese Forderungen werden mehr oder weniger erfüllt, so daß der Kristallgleichrichter ein wertvolles Bauelement darstellt!
Vergleicht man die Kristalldiode mit der Hochvakuumdiode (Röhrendiode), so kommt man zu dem Ergebnis, daß die extrem kleinen Abmessungen, das äußerst geringe Gewicht und die große mechanische Stabilität des Kristallgleichrichters beachtliche konstruktive und schaltungstechnische Vorteile bieten. Der Einsatz dieses Bauelements ist sehr wirtschaftlich, weil es keiner Heizleistung bedarf. Es hat eine nahezu unbegrenzte Lebensdauer. Hinsichtlich der elektrischen Eigenschaften sind die sehr geringe Eigenkapazität (meist kleiner als 1 pF), der große Leitwert und der hohe Wirkungsgrad hervorzuheben. Gegenüber der Röhrendiode sind als Nachteile zu werten: kleine Durchlaßströme, niedrige Sperrspannungen und kleine Sperrwiderstände, relativ große Temperaturabhängigkeit; ferner ist die Exemplarstreuung bezüglich der Kennwerte groß, so daß gegebenenfalls eine bestimmte Sortierung oder Paarung vorgenommen werden muß.
Je nach der Kontaktierung wird zwischen Spitzen-(Punkt-)Dioden und Flächendioden beziehungsweise Flächengleichrichtern unterschieden.

3.121 Spitzen-(Punkt-)Dioden

Das äußere Merkmal dieser Bauart ist eine Kontaktspitze, die den Halbleiterkristall, Germanium oder Silizium, an einem Punkt der Oberfläche berührt.

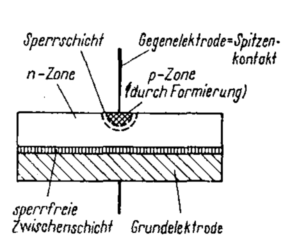


Bild 46
Das System der Spitzendiode

Das System der Spitzendiode ist in Bild 46, der prinzipielle Aufbau in Bild 47 dargestellt.
Eine metallische Grundplatte, deren Oberfläche zum Zwecke einer sperrschichtfreien Bindung verzinnt ist, dient als Träger des einige Zehntel Millimeter dicken Germanium- oder Siliziumplättchens. Dieses ist auf seiner Grundfläche elektroplattiert, um eine Auflötung auf die Grundplatte zu ermöglichen. Die Kontaktierung mit dem Kristall geschieht durch eine Kontaktspitze von einigen μm Durchmesser, in der die s-förmige Gegenelektrode aus Molybdän-, Wolfram-, Platin- oder auch Golddraht ausläuft. Die Spitze sitzt auf der Kristalloberfläche fest auf. Durch einen Formierstoß spezifisch hoher elektrischer Energie ist in der unmittelbaren Umgebung der Kontaktspitze der n-Halbleiter in einen p-Halbleiter umgewandelt worden; es entstand ein pn-Übergang, eine Sperrschicht. An dieser kommt der Gleichrichtereffekt zustande.
Spitzendioden sind meist in einem Glasröhrchen eingeschmolzen (Allglasausführung), einige Typen werden in Metall-Keramik-Technik gefertigt. Beide Ausführungen gewährleisten ausgezeichnete Stabilität und einen luft- und feuchtigkeitssicheren Abschluß (Bild 48).

Einige wichtige Kennwerte für Spitzendioden:

Die Temperaturfestigkeit (Temperaturbereich, in dem eine Anwendung ohne Beeinflussung der Stabi-

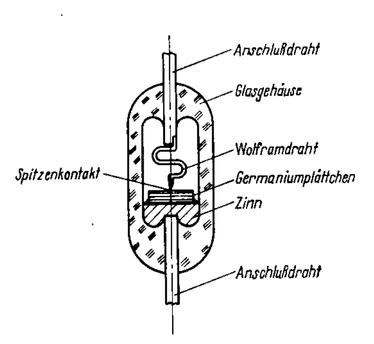


Bild 47
Der Aufbau der Spitzendiode

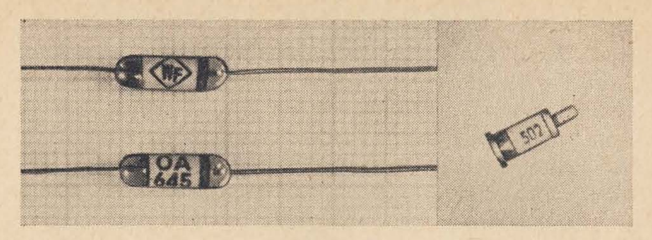


Bild 48 Spitzendioden verschiedener Ausführung

lität und der elektrischen Daten des Bauelements möglich ist) ist groß; sie liegt im Bereich von $-$ 50° bis $+$ 70 °C. Die Temperaturabhängigkeit (TK-Wert) ist beträchtlich; in Sperrichtung kann mit etwa 3 % Sperrstromzunahme je °C gerechnet werden, in Durchlaßrichtung wirkt sich die Abhängigkeit weniger aus.

Der angegebene Durchlaßstrom entspricht dem in Durchlaßrichtung bei $+$ 1 V gemessenen Wert. In Sperrichtung werden für die Sperrspannungen die maximalen Sperrströme angegeben (Bild 49). Die maximalen Werte für die Sperrspannungen und -ströme dürfen nicht überschritten werden, wenn eine Zerstörung der Diode vermieden werden soll!

In bezug auf einige elektrische Größen ist festzustellen, daß zwischen Germaniumdioden und Siliziumdioden

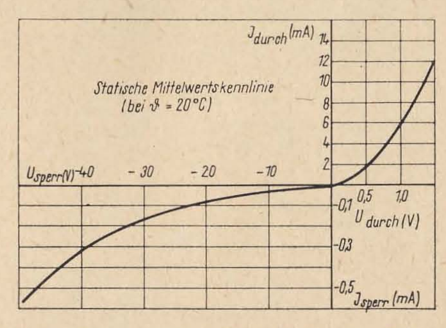


Bild 49 Die statische Kennlinie einer Spitzendiode (OA 645)

mehr oder weniger große Unterschiede bestehen. Ge-Dioden haben bis etwa 300 MHz eine annähernd frequenzunabhängige Richtwirkung; diese Eigenschaft verschlechtert sich dann rasch mit zunehmender Frequenz. Bei noch gutem Wirkungsgrad ist die Richtwirkung von Si-Dioden bis über 1000 MHz hinaus weitgehend frequenzunabhängig. Gegen hohe, kurzzeitige Überbelastungen sind Ge-Dioden weniger empfindlich als Si-Dioden. Der TK-Wert der Ge-Dioden ist größer als der der Si-Dioden.

3.122 Flächendioden, Flächengleichrichter

Ein Unterschied zwischen der Flächendiode und dem Flächengleichrichter besteht nicht, sie können jedoch unterschiedlich eingesetzt werden. Letzterer wird als Niederfrequenzgleichrichter (Gleichrichtung der Netzwechselspannung) benutzt.
Das Bauelement hat eine größere Berührungsfläche zwischen p- und n-Leiter.
Das System ist in Bild 50 dargestellt. Es gleicht bis auf die Kontaktierung der Gegenelektrode mit dem Germanium- oder Silizium-Kristall dem der Spitzendiode. Während bei dieser die Herstellung des pn-Systems und die Bildung der Sperrschicht durch Formierung geschieht, benutzt man bei der Flächendiode ein Legierungsverfahren: Auf das n-leitende Kristallplättchen

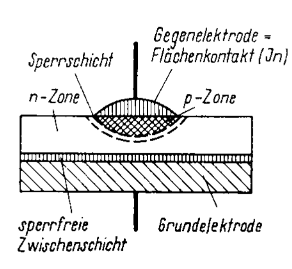


Bild 50
Das System des Flächengleichrichters

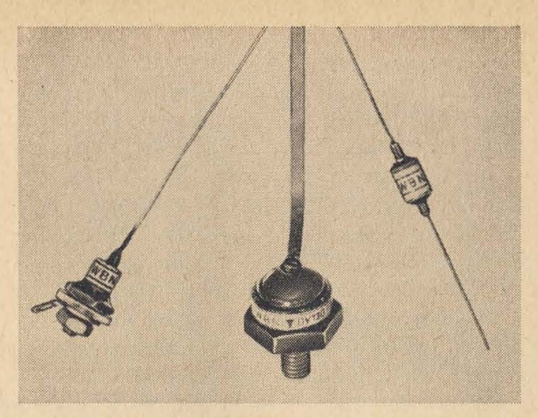


Bild 51 Flächendioden verschiedener Ausführung

wird eine Indiumperle aufgebracht, die man durch starke Erhitzung verflüssigt. Bei diesem Legierungsvorgang bauen sich Indiumatome in das Germanium- oder Siliziumkristallgitter ein, es bildet sich eine p-Zone, deren Berührungsfläche mit dem n-Kristall die für den Gleichrichtereffekt erforderliche Sperrschicht ausmacht. Als Halbleitermaterial wird sowohl Germanium als auch Silizium verwendet.
Flächendioden werden vorwiegend in Glasröhrchen eingeschmolzen, Flächengleichrichter in impuls-verschweißte Metall/Keramik-Gehäuse eingebaut (Bild 51).
Beim praktischen Einsatz von Hochleistungstypen dieses Gleichrichters spielt das Kühlproblem eine beachtliche Rolle, denn selbst die temperaturbeständigsten Halbleiterverbindungen werden durch Übertemperaturen zerstört. Bei Gleichrichtern für Stromstärken bis etwa 0,5 A, die, wie die Spitzendioden in Allglasausführung, freitragend in die Schaltung gelötet werden, reicht die Gehäuseoberfläche zur Wärmeabfuhr aus. Für Gleichrichter, die mit höheren Strömen belastet werden, machen sich besondere Maßnahmen zur Kühlung notwendig. So sind solche

Typen zum Beispiel mit einem Schraubstutzen versehen, der eine Wärmeableitung zum Metallchassis besorgt; höchstbeanspruchte Typen bekommen besondere Kühlbleche. Kühlmaßnahmen sind darüber hinaus bei allen Gleichrichtern erforderlich, wenn sie maximal belastet werden.

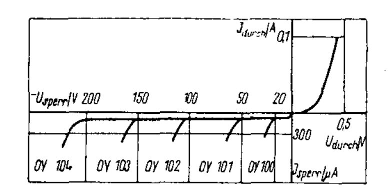
Der Aufbau der Flächendiode beziehungsweise des Flächengleichrichters zeigt, daß durch die weitaus größere Fläche, an der der Gleichrichtervorgang stattfindet, eine unvergleichlich höhere Belastung gegenüber der Spitzendiode möglich und eine größere Stabilität der Kennwerte gegeben ist. Naturgemäß wird dadurch die Kapazität, die bei der Spitzendiode etwa 1 pF beträgt, bei Flächendioden und -gleichrichtern erheblich größer. Somit liegt die Grenzfrequenz niedrig; Flächendioden lassen nur eine Gleichrichtung von Frequenzen bis zu einigen kHz zu. Sowohl Dioden als auch Gleichrichter zeichnen sich durch hohen Durchlaßstrom, hohe Sperrspannung, großen Sperrwiderstand und im Vergleich zur Spitzendiode geringes Eigenrauschen aus.

Hinsichtlich der gleichzurichtenden Leistung, der Temperaturabhängigkeit und des Einflusses der Umgebungstemperatur ist der Silizium- dem Germaniumgleichrichter überlegen.

Vergleich verschiedener Halbleitergleichrichter:

	Selen	Germanium	Silizium
Strombelastung (A/cm²)	0,1	40 bis 100	80 bis 200
maximale Sperrspannung (V)	25 bis 30	600	1000
maximale Betriebstemperatur (°C)	85	65	140
Wirkungsgrad (%)	92	98,5	99,6
relativer Raumbedarf	15	3	1

Bild 52
Statische Kennlinien einiger Germanium-Flächengleichrichter



K e n n w e r t e für die in der Deutschen Demokratischen Republik vom VEB Werk für Fernsehelektronik und VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) hergestellten Kristalldioden und -gleichrichter können der Übersicht Seite 104—107 entnommen werden.

K e n n l i n i e n für einige Germanium-Flächengleichrichter zeigt Bild 52.

Die T y p e n b e z e i c h n u n g der Kristalldioden und -gleichrichter geschieht durch Kurzzeichen, die aus Buchstaben und Kennzahlen bestehen:

O = 0 V Heizung
A = 1 Stromweg (gilt nur für Dioden)
Y = desgleichen (gilt nur für Gleichrichter)

zum Beispiel: OA 625, OAA 646 (Diodenpaar), 04A (Diodenquartett).

In den Übersichten der Kennwerte sind für die kombinierten Dioden die Strom- und Spannungswerte der einzelnen Komponenten angegeben.

Die K e n n z e i c h n u n g d e r P o l u n g erfolgt bei Dioden in Allglasausführung durch einen Farbring; dieser ist am Katodenanschluß angebracht.

Standardisierung, Normung

Für Halbleiterdioden und -gleichrichter ist bereits eine weitgehende Standardisierung nach TGL durchgeführt:
Halbleiterdioden in Glasausführung (Hauptkennwerte)

Ge-Kleinflächendioden	TGL 14976
Ge-Dioden	TGL 14977, 14978, 8095, 8096

Si-Zenerdioden TGL 14979

Si-Flächendioden TGL 14980

Halbleiterdioden
(techn. Lieferbedingungen) TGL 8097, 8098

Halbleiterdioden (Begriffe) TGL 6508
— Geltungsbereich, Allgemeines, elektrische Eigenschaften (Durchlaßrichtung, Sperrichtung, Diodenstrom, Diodenspannung, Widerstände, Temperatur)

Kristall-Flächengleichrichter (Begriffe) TGL 8094
— Allgemeines, elektrische Eigenschaften (Durchlaß- und Sperrichtung, Gleichrichterströme, Gleichrichterspannungen, Widerstände, Verlustleistung, obere Grenzfrequenz), thermische Eigenschaften

Anwendung

Halbleiterdioden und -gleichrichter kann man in den meisten funktechnischen Schaltungen verwenden, in denen Röhrendioden, Gleichrichterröhren oder Trockengleichrichter arbeiten, sei es als Gleichrichter für Wechselspannungen bis zu sehr hohen oder gar Höchstfrequenzen oder als Netzfrequenzgleichrichter.

Ge- oder Si-Dioden werden benutzt als:

Mischdiode in Funkempfängern (bei sehr hohen Frequenzen sind Si-Dioden zu empfehlen);
ZF-Demodulator (Radiotedektor oder Diskriminator) in FM-Schaltungen sowie in Videoschaltungen zur Gleichrichtung der Bildzwischenfrequenz (symmetrische Diodenpaare werden von der Industrie hergestellt);
Dioden-Detektor in Geradeausempfängern kleinster Ausmaße;
Erzeuger der Regelspannung für den selbsttätigen Schwundausgleich;
Meßgleichrichter in Tastköpfen, in Absorptionsfrequenzmessern, Modulationsgradmessern und anderen;
Begrenzer und Stabilisator von Wechselspannungen (es

werden zweckentsprechende Sondertypen hergestellt — siehe Seite 86;

Modulator in der Trägerfrequenztechnik (von der Industrie werden hierfür „Diodenquartette“ hergestellt).

Weitere Anwendung finden sie auf dem Gebiet der Elektronik und der Regeltechnik.

Ge- oder Si-Gleichrichter verwendet man als:

Gleichrichter von Netzwechselspannungen, wobei wegen der größeren Sperrspannung und Temperaturfestigkeit Siliziumgleichrichter vorzuziehen sind. Das Bauelement ist für alle im Abschnitt über Trockengleichrichter angegebenen Gleichrichterschaltungen geeignet. Falls Reihenschaltungen nötig sind, muß man Elemente mit gleichem Sperrstrom verwenden oder jedem Gleichrichter einen Ausgleichwiderstand parallelschalten.

Einbauhinweise

Eine „Löt- und Behandlungsvorschrift“ liegt als Werkstandard vor; die Überleitung in die TGL ist beabsichtigt. Diese Vorschrift hat auch für Transistoren Gültigkeit.

Halbleiterbauelemente sind wegen ihrer Empfindlichkeit gegenüber thermischen Überlastungen in jeder Hinsicht schützend zu behandeln. Einerseits darf die maximale Sperrschichttemperatur keinesfalls überschritten werden, andererseits muß man darauf achten, daß keine zusätzlichen äußeren thermischen Einflüsse zerstörend auf das Bauelement einwirken können. Beim Einlöten in die Schaltung ist für hinreichende Wärmeableitung zu sorgen. Die Anschlußdrähte sind unmittelbar am Element mit einer kalten Flachzange zu fassen. Der Lötkolben soll geerdet oder über einen Trenntransformator angeschlossen sein; der Kolben kann

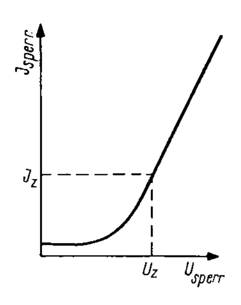
auch während der Dauer des Lötvorgangs aus der Steckdose herausgezogen werden. Wenn eine Kürzung der Anschlußdrähte notwendig ist, dann können diese bis zur Hälfte abgetrennt werden. Die Temperatur an der Durchführung darf 100 °C nicht übersteigen. Mechanische Überbeanspruchung ist zu vermeiden; die Anschlußdrähte dürfen nicht unmittelbar am Glaskörper beziehungsweise an der Durchführung zum Bauelement abgebogen werden.

Besondere Typen von Kristalldioden

a) S c h a l t d i o d e n — Diese für Schaltzwecke bestimmten Bauelemente sind Kleinflächen- oder Spitzendioden mit einem großen Verhältnis von Sperr- zu Durchlaßwiderstand. Sie haben einen Spitzenkontakt aus Golddraht. Derartige Dioden werden als Golddrahtdioden bezeichnet. Beide Typen sind auf Germaniumbasis aufgebaut und in Allglastechnik ausgeführt.
Schaltdioden werden in elektronischen Schaltungen, beispielsweise im Fernsehempfänger als automatischer Umschalter in der Regelspannungs-Verzögerungsschaltung der Vorstufe, für elektronische Rechenmaschinen u. a. m. verwendet.

b) Z e n e r d i o d e n — Die Arbeitsweise des Bauelements beruht auf dem „Zenereffekt“. Dieser ist durch einen Spannungsdurchbruch gekennzeichnet, der einen steilen Anstieg des Sperrstroms bewirkt.
In der Durchlaßrichtung haben Zenerdioden den für Silizium-Flächendioden charakteristischen Verlauf der Kennlinie. In der Sperrichtung sind sie so ausgelegt, daß bei einer definierten Einsatzspannung, der Zenerspannung, die Spannungskurve umknickt. Somit fließt auch in der Sperrichtung ein Strom. Der Zenerstrom steigt bereits bei einer nur geringen Erhöhung der Einsatzspannung steil an. Geringe Spannungsänderungen

Bild 53
Kennlinie einer Zenerdiode im Sperrbereich; U_Z = Zenerspannung, I_Z = Zenerstrom



haben also große Stromänderungen, große Stromänderungen geringe Änderungen der Spannung zur Folge. Das Gebiet oberhalb des Abknickens der Kennlinie ist der Arbeitsbereich der Zenerdiode. Die Verhältnisse gehen aus dem Diagramm in Bild 53 hervor. Bemerkenswert ist, daß die Charakteristik dieser Diode grundsätzlich der des Glimmstrecken-Stabilisators entspricht; der wesentliche Unterschied liegt in der Einsatzspannung, die bei Zenerdioden gering ist.
Als Halbleitermaterial der mit Flächenkontakt arbeitenden Zenerdiode dient Silizium. Die normalen Zenerdioden (Typenbezeichnung ZA) sind für geringe Belastung bestimmt, höher belastbare Elemente stellen die Hochleistungszenerdioden (Typenbezeichnung ZL) dar. Erstere werden in Allglastechnik, Leistungszenerdioden in Metall/Keramik ausgeführt.

Kennwerte von Zenerdioden und Hochleistungszenerdioden des VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder)

Zenerdioden

Type	Zenerspannung U_z (V)
ZA 250/5	4,4 bis 5,6
6	5,4 bis 6,6
7	6,4 bis 7,6
8	7,4 bis 8,6
9	8,4 bis 9,6

Zenerstrom I_z	3 mA
Sperrspannung U_{zKA}	1 V
Sperrstrom I_{zKA}	$\leqq$ 0,1 μA
Verlustleistung P_{Vmax}	250 mW

Hochleistungszenerdioden

Type	Zenerspannung U_z (V)
ZL 910/ 6	5,8 bis 7,2
8	6,8 bis 9,2
10	8,8 bis 11,2
12	10,8 bis 13,2
14	12,8 bis 15,2
16	14,8 bis 17,2

Sperrstrom I_{zKA}	$\leqq$ 0,1 μA
Durchlaßstrom I_{zAK}	500 mA
Verlustleistung P_{Vmax} (45 °C ohne Wärmeableitung)	1 W
Temperaturbereich t_a	$-55°$ bis $+150$ °C

Mit Zenerdioden können hochkonstante, im Bereich der Zenerspannung liegende Gleichspannungen stabilisiert werden. Bei Änderungen der Speisespannung von $\pm$ 15 % ist eine Stabilisierung bis auf 1 % möglich. Ferner werden Zenerdioden zur Begrenzung von Wechselspannungen (2 gegenseitig geschaltete Elemente) und als Überspannungsschutz, zum Beispiel in Meßinstrumenten, verwendet.
Ein genormtes Schaltsymbol existiert noch nicht; es wird im allgemeinen — auch international — das abgebildete Symbol gebraucht (Bild 55).

c) Tunneldioden — Obgleich diese Flächendiode, deren Arbeitsweise auf dem „Tunneleffekt" beruht, bei uns noch nicht hergestellt wird, kann eine kurze Betrachtung nützlich sein. Bei dem genannten Effekt können Ladungsteilchen eine Potentialschwelle durchdringen, ohne daß ihnen zusätzliche Energie zugeführt werden muß. Die Teilchen erscheinen augenblicklich an der anderen Seite der Schwelle, so als ob sie einen

„Tunnel“ unter dieser benutzt hätten. Das Kennzeichen des neuen Bauelements ist ein außergewöhnlicher Verlauf der Strom/Spannungs-Kennlinie. Nach einem durch den Tunneleffekt hervorgerufenen steilen Anstieg des Stromes (Höckerstrom) fällt dieser infolge Verringerung der Sperrschichtfeldstärke etwas weniger steil ab (Talstrom), um wieder, wie bei der normalen Halbleiterdiode, anzusteigen. Bei der praktischen Anwendung der Tunneldiode interessiert lediglich der fallende Teil der Kennlinie. Als Halbleitermaterial dienen Germanium, Silizium und Galliumarsenid.
Tunneldioden werden zur Schwingungserzeugung und Verstärkung, insbesondere der Höchstfrequenzen, zur Entdämpfung von Schwingkreisen, als elektronische Schalter und zur Impulserzeugung verwendet.

3.2 Halbleiterverstärker (Kristallverstärker, Transistoren)

Als verstärkendes Element hat der Transistor*) in funktechnischen und elektronischen Schaltungen zahlreiche Anwendungsmöglichkeiten gefunden.
Die Eigenschaften des Transistors, der im Prinzip aus 2 gegeneinandergeschalteten pn-Gleichrichtern besteht, beruhen auf dem Zusammenwirken der beiden engbenachbarten, als Diodenstrecken aufzufassenden pn-Übergänge (Sperrschichten) im Halbleitermaterial. In der Transistortechnik wird als Halbleiterwerkstoff vorwiegend Germanium benutzt.
Über die elektronischen Vorgänge im Halbleiterkristall und dessen Leitungsmechanismus wurde auf S. 65 ff und S. 76 gesprochen; diese Ausführungen sind naturgemäß auch für den Halbleiterverstärker gültig.

* Die für den Halbleiter- oder Kristallverstärker allgemein gebräuchliche Bezeichnung „Transistor“ ist von *transfer resistor* = Übertragungswiderstand abgeleitet. Diese wörtliche Übersetzung charakterisiert jedoch nicht eindeutig das Wesen des Bauelements.

Der Halbleiterkörper des Transistors besteht aus 3 Teilgebieten, den **Halbleiterzonen**. Sie weisen spezielle, durch die Leitungsart gekennzeichnete Eigenschaften auf:

n = Elektronenleitung,
p = Defektleitung (Löcherleitung)

und kommen in den Folgen npn und pnp vor (Bild 54). Die drei Halbleiterzonen sind:

Basis (Block)	B,b
Emitter	E,e
Kollektor	C,c

Der Emitter ist die Zone, die Ladungsträger aussendet (lat. emittere = ausgeben); der Kollektor nimmt diese auf (lat. colligere = sammeln).
In dem in Bild 55 wiedergegebenen Schaltsymbol des Transistors sind die Elektroden, die die Verbindungen mit den entsprechenden Halbleiterzonen darstellen, mit den Indices versehen. Die im Schaltsymbol zur Basis

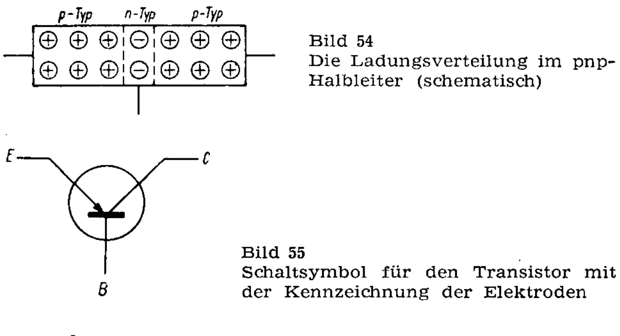


Bild 54
Die Ladungsverteilung im pnp-Halbleiter (schematisch)

Bild 55
Schaltsymbol für den Transistor mit der Kennzeichnung der Elektroden

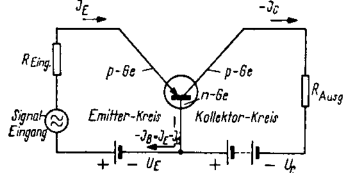


Bild 56
Schema der Arbeitsweise des Transistors

hinweisende „Spitze“ des Emitters kennzeichnet den pnp-Typ des Transistors.
Charakteristisch für Transistoren ist, daß ein Stromkreis im Halbleiterkristall durch einen zweiten Stromkreis beeinflußt wird; es ist ein steuernder sowie ein gesteuerter Kreis vorhanden. An der im Bild 56 gezeigten Anordnung (Grundschaltung) wird die Arbeitsweise des pnp-Transistors erläutert. Das Schema läßt auch die Stromrichtungen erkennen und zeigt, daß alle vom Kristall wegfließenden Ströme ein negatives Vorzeichen haben. Eine Addition der Ströme unter Berücksichtigung ihrer Vorzeichen ergibt:

$$I_B + I_C + I_E = 0.$$

Im Kollektorkreis liegt der Pluspol der Spannungsquelle U_C an der Basis (n-Germanium), der Minuspol am Kollektor (p-Germanium). Als Diode betrachtet arbeitet diese pn-Verbindung in Sperrichtung. Demzufolge kann nur ein geringer Kollektorstrom (Diodensperrstrom!) fließen. Die pn-Verbindung im Emitterkreis — Minuspol U_E an der Basis und Pluspol am Emitter (p-Germanium) — arbeitet in Durchlaßrichtung, so daß sich ein großer Emitterstrom einstellen müßte. Hier muß man aber berücksichtigen, daß die Basisschicht äußerst dünn ist; infolgedessen wird der größte Teil der p-Ladungsträger aus dem Emitterkreis vom Kollektor aufgenommen. Der Stromfluß im Kollektorkreis läßt sich also durch den Emitterstrom steuern, wobei jedoch eine Änderung von I_C nicht genau der Änderung von I_E folgt. Das Verhältnis der beiden Änderungen wird als Stromverstärkungsfaktor bezeichnet:

$$\alpha = \triangle I_C / \triangle I_E.$$

Wegen des niederohmigen Emitterwiderstands können mit einer kleinen Eingangswechselspannung große Änderungen des Emitterstroms hervorgerufen werden. Am Ausgangswiderstand R_A steht dann eine verstärkte Wechselspannung zur Verfügung. Die Ursache für die Verstärkungswirkung des Transistors bilden der kleine Eingangswiderstand und der große Ausgangswiderstand.

Gegenüber der bei der Elektronenröhre üblichen Schaltungstechnik erfordert der Transistor eine andersgeartete. Der unterschiedliche innere Leitungsmechanismus läßt einen Vergleich der Funktion der Elektroden eines Transistors mit der Elektrodenfunktion einer Röhre nur bedingt zu. Formal sind vergleichbar:

Transistor	Röhre
Emitter	Katode
Basis	Gitter
Kollektor	Anode

Je nachdem, welcher Elektrode des Transistors das Eingangssignal zugeführt wird, ergeben sich 3 Schaltungsvarianten:

Basisschaltung (als Grundschaltung anzusehen),
Emitterschaltung,
Kollektorschaltung.

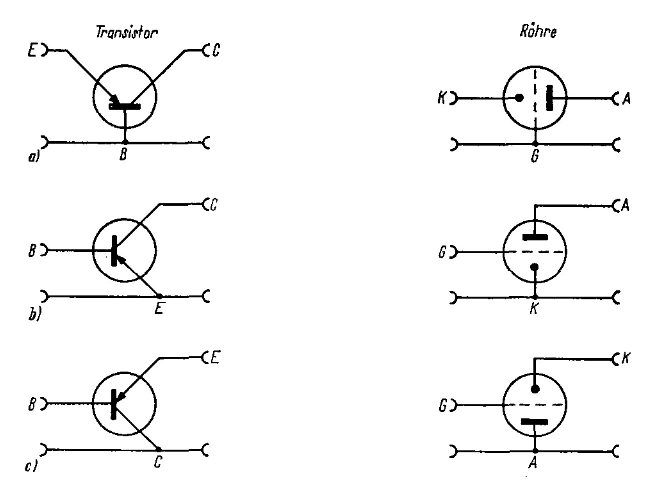


Bild 57 Die Schaltungsvarianten des Transistors;
a) Basisschaltung ≙ Röhren-Gitterbasisschaltung,
b) Emitterschaltung ≙ Röhren-Katodenbasisschaltung,
c) Kollektorschaltung ≙ Röhren-Anodenbasisschaltung

Diese Schaltungen sind im Bild 57 mit den vergleichbaren Röhrenschaltungen dargestellt.

Die Basisschaltung, bei der die Basiselektrode am Schaltungsnullpunkt (Erdpotential) liegt, ist durch einen sehr kleinen Eingangswiderstand (R_E 50 bis 200 Ohm) und einen großen Ausgangswiderstand R_A 0,5 bis 5 MOhm) gekennzeichnet. Die Stromverstärkung ist < 1 (es findet also keine Stromverstärkung statt). Da jedoch der Ausgangswiderstand um ein vielfaches größer ist als der Eingangswiderstand, kann in den Kollektorkreis-Ausgang ein hochohmiger Wechselstromwiderstand geschaltet werden, an dem, nach dem Ohmschen Gesetz, kleine Stromschwankungen große Spannungsänderungen hervorrufen.

Infolge des kleinen Eingangswiderstands ergeben sich Anpassungsschwierigkeiten.

Bei der Emitterschaltung liegt die Emitterelektrode auf Erdpotential; der Basisstrom wird gesteuert. Der Eingangswiderstand ist hier wesentlich größer als bei der Basisschaltung; er beträgt etwa 1 kOhm. Hiermit bietet sich eine bessere Anpassungsmöglichkeit. Der Ausgangswiderstand ist kleiner als bei der Basisschaltung (etwa 50 kOhm). Mit der Emitterschaltung läßt sich eine sehr hohe Stromverstärkung und, trotz der geringen Spannungsverstärkung, auch eine gute Leistungsverstärkung erzielen. Diese Schaltung wird in der Verstärkerpraxis am häufigsten verwendet.

Das Merkmal der Kollektorschaltung — Kollektor am Schaltungsnullpunkt — ist der höhere Eingangs- und der niedrigere Ausgangswiderstand (etwa 500 kOhm bzw. 100 Ohm). Die Leistungsverstärkung ist gering. Die Schaltung kann zur Widerstandstransformation (Impedanzwandlung) eingesetzt werden.

Ein Vergleich der Eigenschaften der zur Zeit verfügbaren Transistoren mit denen der Elektronenröhren zeigt folgende Übersicht:

Vorteile des Transistors sind:

extrem kleine Abmessung, geringstes Gewicht,
größte Stabilität gegen äußere Einflüsse,
fast unbegrenzte Lebensdauer,
sehr geringe Versorgungsspannung, kein Bedarf an Heizleistung (Speiseleistung 10 μW gegenüber 10 mW bei der Röhre),
hoher Wirkungsgrad (bis 90 % gegenüber 10 bis 30 % bei der Röhre);

Nachteile, die die Anwendung des Transistors anstelle einer Röhre nur bedingt erlauben, sind:

niedrigere obere Grenzfrequenz,
höhere Temperaturempfindlichkeit,
stärkeres Eigenrauschen,
größere Frequenzabhängigkeit,
geringere Ausgangsleistung,
niedriger Eingangswiderstand,
stärkere Streuung der Kenndaten.

Der wesentliche Unterschied zwischen Transistor und Elektronenröhre ist hinsichtlich der Verstärkung festzustellen. Da der Transistor einer — allerdings ganz minimalen — Steuerleistung bedarf, steht die Leistungsverstärkung im Vordergrund. Es können in der Emitterschaltung Werte bis zu einigen 1000 erreicht werden. Bei der Röhre ist die Spannungsverstärkung von primärem Interesse.

Die obere Grenzfrequenz liegt bei Transistoren bedeutend niedriger als bei Röhren. Einem Wert von 10 000 MHz, wie er von einigen Höchstfrequenztypen (Klystrons oder Magnetrons) erreicht wird, stehen selbst bei Sonderausführungen von Transistoren (Mesa-Transistoren) einige 100 MHz als obere Grenzfrequenz gegenüber.

Die Temperaturabhängigkeit der Kennwerte, die insbesondere die Verstärkereigenschaften beeinflußt, ist sehr groß. Bereits Umgebungstemperaturen von 45 °C können die Funktion des Transistors beein-

trächtigen. Röhren sind weitgehend temperaturunabhängig.

Im Hinblick auf die Ausgangsleistung liegt der Transistor weit hinter der Röhre zurück. Mit NF-Leistungstransistoren ist eine Leistungsabgabe von einigen 10 W zu erreichen. Moderne wassergekühlte Sendetrioden haben Ausgangsleistungen von 100 kW.
Je nach dem Aufbau des Bauelements sind 2 Bauarten zu unterscheiden: Spitzentransistor und Flächentransistor.

3.21 Spitzentransistoren

Beim Spitzentransistor berühren 2 Kontaktspitzen den Halbleiterkristall an 2 eng benachbarten Punkten der Oberfläche.
In Bild 58 ist das System, in Bild 59 der prinzipielle Aufbau dargestellt.
Wie das Schema zeigt, besteht gegenüber der Spitzendiode der Unterschied, daß beim Spitzentransistor 2 unmittelbar nebeneinanderliegende p-Halbleitergebiete vorhanden sind. Demzufolge treten auch 2 pn-Übergänge (Sperrschichten) auf. Analog zur Spitzendiode wird das n-Germanium (Kristall) in p-Germanium durch Formierung ungewandelt.
Der Kristall bildet die Basiszone oder Basis; an ihr liegt eine großflächige Metallelektrode sperrfrei an. Die eine p-Zone ist der Emitter, mit der die Emitterelektrode kontaktiert wird, die andere p-Zone

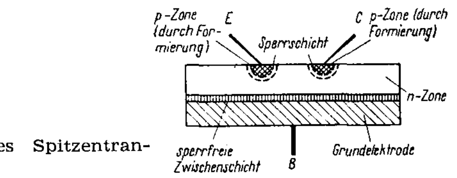


Bild 58
Das System des Spitzentransistors

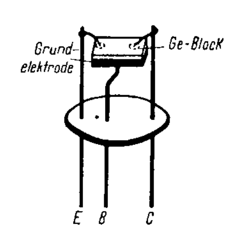


Bild 59
Der prinzipielle Aufbau des Spitzentransistors

der Kollektor, mit der Kollektorelektrode verbunden. Beide Elektroden aus Phosphorbronze- oder Platindraht laufen in einer Spitze mit einem Durchmesser von 10 bis 20 μm aus; der gegenseitige Spitzenabstand beträgt 30 bis 50 μm.
Wegen der extrem kleinen Kontaktflächen der Spitzenelektroden ist die Strombelastbarkeit dieses Transistors sehr gering, daher sind auch größere Verlustleistungen nicht zu erwarten. Die kleinen Sperrwiderstände (R_i am Kollektor 10 bis 13 kOhm) erlauben nur eine etwa 100fache Leistungsverstärkung. Die Stromverstärkung ist $>$ 1 und liegt zwischen 2 und 5. Als eine sehr gute Eigenschaft kann man die relativ hohe Grenzfrequenz von etwa 30 MHz ansehen. Wegen des immerhin labilen konstruktiven Aufbaues bleibt das Bauelement gegen größere mechanische Beanspruchung empfindlich. Ferner ist die Exemplarstreuung groß. Die Kennlinie des Spitzentransistors ähnelt der einer Triodenkennlinie.
Heute hat der Spitzentransistor seine Bedeutung verloren; und er wird bei uns auch nicht mehr hergestellt. Weder seine elektrischen noch mechanischen Eigenschaften halten einen Vergleich mit dem Flächentransistor aus.

3.22 Flächentransistoren

Beim Flächentransistor bestehen innerhalb des Germaniumkristalls die Bereiche p-n-p oder n-p-n.

2 Zonen gleicher Leitungsart, Emitter und Kollektor, *schließen eine dritte Zone mit entgegengesetzter Leitungsart*, die Basis, ein.
Von der konstruktiven Seite aus gesehen, ist zwischen dem gezogenen und dem legierten Typ zu unterscheiden.

a) Der *gezogene Transistor* besteht aus einem Germaniumkristall, dem beim Ziehvorgang durch wechselnde Beigabe von 3- und 5wertigen Fremdatomen (Gallium bzw. Antimon) eine wechselweise Leitungsart, eine pnp-Zonenfolge, übertragen wurde. Hierbei entstehen 2 pn-Übergänge (Sperrschichten). Infolge der äußerst dünnen Basisschicht (0,1 bis 0,01 mm) bereitet die Kontaktierung der Basiselektrode – die meist mit einem Golddraht erfolgt – erhebliche Schwierigkeiten; am häufigsten werden elektronische Verfahren angewendet.
Bild 60 zeigt das System, Bild 61 den grundsätzlichen Aufbau des gezogenen Flächentransistors.
Das Ziehen einer pnp-Folge ist allerdings bei weitem schwieriger als das einer npn-Folge. Indessen werden allgemein pnp-Transistoren bevorzugt, und somit sind gezogene Transistoren von geringem Interesse. Fast alle derzeit handelsüblichen Transistoren sind Legierungstransistoren.

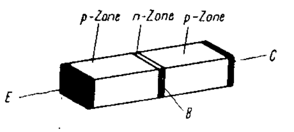


Bild 60
Das System des gezogenen Flächentransistors

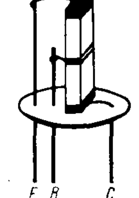


Bild 61
Der prinzipielle Aufbau des gezogenen Flächentransistors

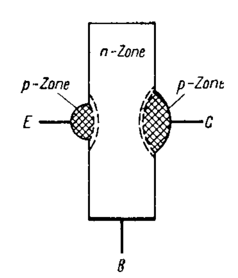


Bild 62
Das System des Legierungstransistors

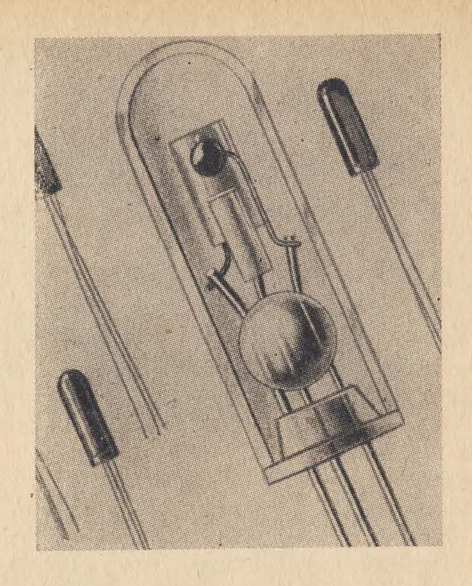
b) Beim *Legierungstransistor* werden die beiden p-Zonen, Emitter und Kollektor, durch Einlegieren von Fremdatomen in die beiden gegenüberliegenden, die Basiszonen darstellenden Flächen des n-Germaniumkristalls erzeugt. Der Legierungsprozeß geht so vor sich, daß beiderseits auf ein Kristallplättchen von etwa 5 mm Länge, 2 mm Breite und 0,1 mm Dicke kleine Indiumperlen aufgesetzt und bei hoher Temperatur zum Schmelzen gebracht werden. Der in den Kristall eindringende Anteil des Indiums bildet mit dem Germanium eine Legierung. Diese ist p-leitend und bewirkt folglich den Aufbau von pn-Übergängen. Die beiden p-Zonen sind Emitter und Kollektor, die n-Zone ist die Basis. In die Indiumperlen werden Anschlußdrähte eingeschweißt; der Basisanschluß geschieht, ebenfalls sperrfrei, am Kontakt.

Das System ist in Bild 62, der Aufbau in Bild 63 dargestellt.

Die gesamte auf einem Sockel aufgebaute Anordnung wird in eine mit diesem impulsverschweißte Kappe aus Metall oder in eine Glaskappe eingeschlossen. Zur Stabilisierung des Systems ist die Kappe mit einer wärmeleitenden Vergußmasse ausgefüllt. Um fotoelektrische Effekte im Halbleiter zu vermeiden, muß das Gehäuse lichtdicht sein. Glaskappen sind mit einem Überzug aus schwarzem Lack versehen (Bild 64).

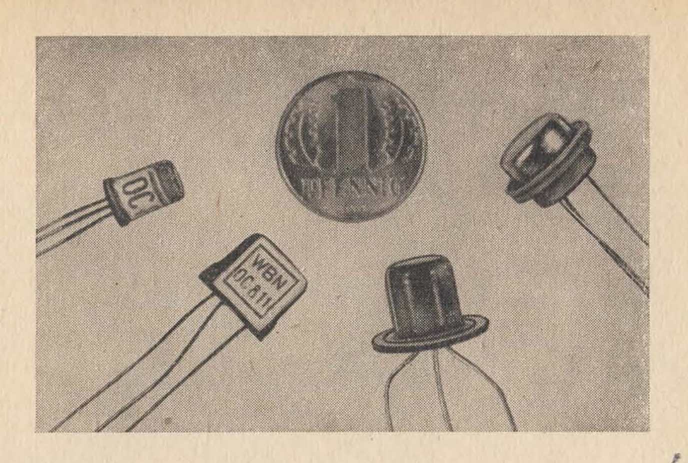
Transistoren für hohe Ausgangsleistungen ($P_{max} \geqq 1$ W), also NF-Leistungstransistoren, bei denen

Bild 63
Der Aufbau des Legierungs-transistors (Valvo OC 70)



die große Kollektorverlustleistung eine Temperaturerhöhung an der Kollektorsperrschicht beziehungsweise im Kristall bewirkt, erfordern eine besondere Wärmeableitung. Sie ist mit massiven Metallgehäusen zu erzielen, die, je nach Schaltung, unmittelbar oder durch Zwischenlagen von Isolierringen aus wärmeleitendem Material (z. B. Glimmer), auf das als Kühlfläche wirkende Metallchassis montiert werden. Transistoren bis 150 mW Verlustleistung kann man, falls notwendig, mit einer kleinen Kühlschelle versehen. Diese gestattet die Verbindung (meist Schraubverbindung) mit einer beliebigen Kühlfläche.

Die im folgenden angegebenen, summarischen Werte für einige elektrische Eigenschaften handelsüblicher Flächentransistoren gelten jeweils für zweckentsprechende Typen; so ist zum Beispiel bei HF-Transistoren die Grenzfrequenz und nicht die Leistungsabgabe von besonderer Bedeutung; bei NF-Leistungstransistoren,



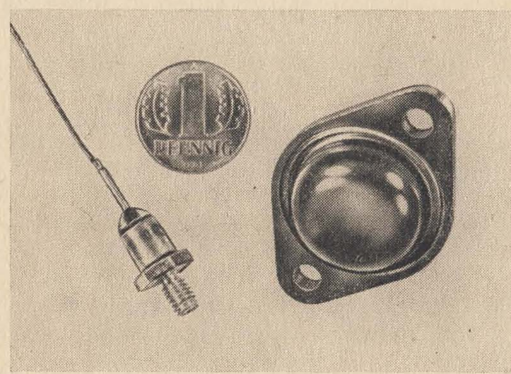


Bild 64 Flächentransistoren verschiedener Ausführung

die hohe Leistung an den Lastwiderstand abzugeben haben, sind die Verhältnisse gerade umgekehrt.
Durch die gegenüber dem Spitzentransistor höhere *Strombelastung* sind *Verlustleistungen* von mehreren W zu erreichen. Je mm² Kristallquerschnitt darf man mit einer *Ausgangsleistung* von etwa 100 mW rechnen. Die *Spannungsver-*

stärkung kann bis zu 10^3 bis 10^5 betragen, die Leistungsverstärkung 10^3 bis 10^4. Die Grenzfrequenzen liegen heute bei etwa 100 MHz. Mit 5 bis 20 dB ist der Rauschfaktor niedrig. Beachtlich der Wirkungsgrad, der 50 % erreichen kann. Bei Überschreiten der Sperrschichttemperatur von 75 °C ändern sich die Kenndaten des Bauelements sehr rasch. Die Betriebsspannungen sind, von NF-Leistungstransistoren abgesehen, äußerst gering; normalerweise reichen einige Volt aus. Mechanisch können Flächentransistoren hoch beansprucht werden.

Die Kennlinie der Flächentransistoren ist der Pentodenkennlinie ähnlich.

> Kennwerte für die in der Deutschen Demokratischen Republik vom VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) hergestellten Flächentransistoren können der Übersicht Seite 108 ff entnommen werden.

Die Typenbezeichnung geschieht durch Kurzzeichen, die aus 2 Buchstaben und einer Kennziffer bestehen. Die in Deutschland gefertigten Typen tragen, mit einigen Ausnahmen, die Bezeichnung

OC ....

Eine vom VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) hergestellte Typenreihe, deren Transistoren speziell für Lehr- und Amateurzwecke geeignet und zu Sonderpreisen erhältlich sind, ist mit

LA ....

bezeichnet.

Für die Kennzeichnung der in der Deutschen Demokratischen Republik gefertigten Transistoren sind gegenwärtig noch verschiedene Schemata gebräuchlich. Diesen ist jeweils als wichtiger Kennwert der Stromverstärkungsfaktor zugrunde gelegt.

Anzahl der Punkte	Stromverstärkungsfaktor
1	20 bis 32
2	32 bis 50
3	50 bis 80
4	> 80

Nach Angaben des Herstellers in den technischen Unterlagen gilt für die Transistoren OC 816···818, OC 825···827 und OC 870···872 folgende Kennzeichnung:

Gruppe	Stromverstärkung in Emitterschaltung	Kennzeichnung
a	18 bis 33	I
b	27 bis 55	II
c	45 bis 88	III
d	über 72	IIII

Nach der Umstellung der Fertigung der Typen mit flacher Bauform (OC 810···823) auf die neue runde Bauform (OC 824···827; Äquivalenttypen!) hat das bisher verwendete, nachstehend wiedergegebene Schema nur noch hinsichtlich der Identifizierung der Flachbauformtypen Bedeutung.

Farbpunkt	Stromverstärkungsfaktor
rot	20 bis 30
orange	30 bis 40
gelb	40 bis 50
grün	50 bis 60
blau	60 bis 75
violett	75 bis 100
weiß	> 100

Beim Einbau der Transistoren in die Schaltung ist auf die P o l u n g zu achten; falsche Anschlüsse können zur Zerstörung des Bauelements führen. Aus der auf Seite 110 wiedergegebenen Übersicht über T r a n s i s t o r b a u f o r m e n geht die Anordnung der Anschlüsse hervor.

Die auf Seite 83 besprochene Löt- und Behandlungsvorschrift gilt auch für Transistoren.

Standardisierung, Normung

Transistoren (Begriffe) TGL 6548

Germanium-Transistoren (Maße, Kennwerte)
— OC 810···816 — TGL 8099

Germanium-pnp-NF-Transistoren,
Verlustleistung 150 mW (Hauptkennwerte) TGL 11054

Transistoren, runde Bauform mit Leistungen
von 50···750 mW (Abmessungen) TGL 11811

Transistoren (Löt- und Behandlungsvorschrift)
MW 2 — N 1.3532 (Werkstandard)

Begriffe der Halbleitertechnik DIN 41852 (Entwurf)
(Es sind 109 Begriffe erläutert; siehe auch „Halbleiterbauelemente“ von K. Grauhering — S. 51 ff) —

Anwendung

Transistoren sind in zahlreichen funktechnischen Schaltungen, in denen Elektronenröhren arbeiten, an ihrer Stelle verwendbar. Im Rundfunk- und Amateursuper können mit handelsüblichen Transistoren bestückt werden:
HF-Vorstufe, Misch- und Oszillatorstufe, ZF-Verstärkerstufe (AM und FM), Treiberstufe, NF-Vorverstärkerstufe, Endverstärkerstufe in Eintakt- und Gegentakt- (A- oder B-) Betrieb.
Unter Verwendung von Miniaturbauteilen findet die Schaltung einschließlich Lautsprecher und Batterie in einem Gehäuse mit äußerst geringem Volumen Platz. Ein noch wesentlich kleineres Gerät läßt sich mit einer transistorierten Audionschaltung aufbauen.
Ferner können mit Transistoren in Kleinstbauweise ausgeführt werden:

Amateur-Kurzwellensender (auch quarzgesteuert), Telegrafieüberlagerer (BFO), Griddipper, Prüfgeneratoren, Tongeneratoren, Mikrofonvorverstärker, Mischpultverstärker, Stereoverstärker, Hörhilfegeräte und anderes mehr. Auch als Impedanzwandler ist der Transistor geeignet.

Viele Möglichkeiten der Anwendung gibt es auf dem Gebiet der Elektronik (Impuls- und Steuertechnik, Speicherschaltungen, Zählschaltungen). Hier werden den Transistoren Schaltaufgaben übertragen. Wichtige Anordnungen sind Transverter (Gleichspannungswandler), Multivibratoren, Zeitschalter, Lichtschranken und dergleichen. Für Schaltanwendung benutzt man spezielle „Schalttransistoren", von denen auch in der DDR mehrere Typen hergestellt werden (OC 822, 823, 828, 829, 832, 833, 837, 838, 874).

Darüber hinaus gibt es Anwendungsmöglichkeiten, die mit einer Röhre überhaupt nicht realisierbar sind, so zum Beispiel eine medizinische Sonde (Magensonde, von Manfred von Ardenne entwickelt).

Die unten aufgeführten besonderen Arten von Transistoren sind Weiterentwicklungen. Zum Teil haben sie noch nicht die Verbreitung gefunden, die infolge ihrer besseren Eigenschaften wünschenswert wäre. Es läßt sich nicht verkennen, daß die Technologie in den meisten Fällen sehr schwer zu beherrschen ist, so daß es häufig bei einer Laborentwicklung bleibt. Besondere Schwierigkeiten verursacht unter anderem die Kontaktierung der äußerst dünnen Basisschichten, die ja eine Voraussetzung für hohe obere Grenzfrequenzen sind.

Mit der weiteren Entwicklung werden in erster Linie möglichst hohe Grenzfrequenzen, die eine Anwendung des Transistors auch im Höchstfrequenzgebiet erlauben, und die Verarbeitung von größeren Leistungen angestrebt.

In der Übersicht sind die für Grenzfrequenz und Verlustleistung angegebenen Größen ungefähre Werte.

Art	obere Grenzfrequenz	maximale Kollektor-verlustleistung
Diffusionstransistor. Drifttransistor	einige 100 MHz	150 mW
Mesa-Transistor	einige 100 MHz	200 mW
Surface-Barrier-(Oberflächen-Sperrschicht-)Transistor	50 bis 100 MHz	5 mW
Intrinsic-Barrier-(Zwischen-schicht-)Transistor	einige 100 MHz	
Feldtransistor, Feldeffekttransistor	etwa 50 MHz	300 mW
Tecnotron-Transistor	einige 100 MHz	125 mW
Spacistor	einige 1000 MHz	

4. ANHANG

Übersicht über die vom VEB Werk für Fernseheelektronik Berlin-Oberschöneweide hergestellten Germanium- und Silizium-Dioden

Type	Durchlaßspannung U_{AK} (V)	Durchlaßstrom I_{AK} (mA)	Sperrspannung U_{KA} (V)	Sperrstrom I_{KA} (μA)	maximale Sperrspannung U_{KAmax} (V)	maximaler Durchlaßstrom I_{AKmax} (mA)	Verwendungszweck
				bei t_a = 25 °C			
Germaniumdiod Universaldioden							
OA 625	1	≧ 5	10 20	≦ 100 ≦ 200	20 20	20 4	Universaldiode mit niederohmigem Durchlaßwiderstand
OA 645	1	≧ 3	10 40	≦ 100 ≦ 500	40 35	15 3	Universaldiode
OA 665	1	≧ 3	10 60	≦ 50 ≦ 500	60 50	12 2,5	Universaldiode
OA 685	1	≧ 2	10 80	≦ 50 ≦ 500	80 65	10 2	Universaldiode mit hochohmigem Sperrwiderstand
OA 705	1	≧ 2	10 100	≦ 15 ≦ 250	100 80	10 2	Universaldiode mit hochohmigem Sperrwiderstand
Videodiode OA 626	1	≧ 3	10 20	≦ 100 ≦ 500	20 20	20 4	zur Gleichrichtung der Bildzwischenfrequenz
Diodenpaare OAA 646	1	≧ 5	10 40	≦ 100 ≦ 500	40 35	10 2	als Ratiodetektor
20A 646	1	≧ 5	10 40	≦ 40 ≦ 300	40 35	15 3	als Ratiodetektor
Diodenquartett 04A 657	1	7,5...12,5	10 40	≦ 40 ≦ 300	40 35	15 3	zum Modulieren der Trägerfrequenz mit Trägerunterdrückung
Richtdioden							für dm-Wellenbereich Richtstrom I (mA) / HF-Leistung
OA 601	1	≧ 5	5	≦ 1000	5	15	≧ 4,5 bei 50 mW
OA 602	1	≧ 5	5	≦ 1000	5	15	≧ 3,5 bei 50 mW
OA 603	1	≧ 5	10	≦ 1000	10	20	≧ 7 bei 200 mW
OA 604	1	≧ 5	10	≦ 1000	10	20	≧ 4,5 bei 200 mW
OA 605	1	≧ 5	20	≦ 1000	20	20	≧ 4,5 bei 200 mW
Siliziumdioden							Silizium-Flächendioden mit hohem Sperrwiderstand (maximale Verlustleistung P_{vmax} = 250 W)
OA 900	1	≧ 50	≧ 25 10	100 ≦ 0,1			
OA 901	1	≧ 50	≧ 50 10	100 ≦ 0,1			
OA 902	1	≧ 40	≧ 75 10	100 ≦ 0,1			
OA 903	1	≧ 40	≧ 150 10	100 ≦ 0,1			

Die in den Spalten maximale Sperrspannung und maximaler Durchlaßstrom an erster Stelle angegebenen Werte gelten für eine Außentemperatur von 25 °C, die an zweiter Stelle von 60 °C.

Übersicht über die vom VEB Halbleiterwerk Frankfurt (Oder) hergestellten Germanium- und Silizium-Gleichrichter

Typ	Sperr-spannung U_{KA} (V)	Sperrstrom I_{KA} (mA)	Durchlaß-strom I_{AK} (A)	Durchlaß-spannung U_{AK} (V)	Spitzen-strom $I_{ak\,max}$ (A)	$t_{a\,max}$ (°C)	Verwendungszweck
Kenn- und Grenzwerte bei $t_a = 25\,°C$							
Germanium-Gleichrichter		(25 °C)					
OY 100	20	$\leqq$ 0,1	0,1	0,5	0,35	60	Gleichrichter für kleine Ströme
OY 101	50	$\leqq$ 0,1	0,1	0,5	0,35	60	
OY 102	100	$\leqq$ 0,1	0,1	0,5	0,35	60	
		(25 °C)					
OY 110	20	$\leqq$ 0,1	1	1	3	60	Gleichrichter für mittlere Ströme
OY 111	50	$\leqq$ 0,1	1	1	3	60	
OY 112	100	$\leqq$ 0,1	1	1	3	60	
OY 113	150	$\leqq$ 0,1	1	1	3	60	
OY 114	200	$\leqq$ 0,1	1	1	3	60	
		(25 °C)					
OY 120	20	$\leqq$ 1	10	0,6	32	35	Gleichrichter für hohe Ströme
OY 121	40	$\leqq$ 1	10	0,6	32	35	
OY 122	65	$\leqq$ 1	10	0,6	32	35	
OY 123	100	$\leqq$ 1	10	0,6	32	35	
OY 124	150	$\leqq$ 1	10	0,6	32	35	
OY 125	200	$\leqq$ 1	10	0,6	32	35	
Silizium-Leistungsgleichrichter		(115 °C)					
OY 910	50	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	Gleichrichter mit erweitertem Temperaturanwendungsbereich
OY 911	100	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	
OY 912	200	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	
OY 913	300	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	
OY 914	400	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	
OY 915	500	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	
OY 916	600	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	
OY 917	700	$\leqq$ 0,5	1	1,2	5	100	

Germanium-Kleinsignal-Transistoren

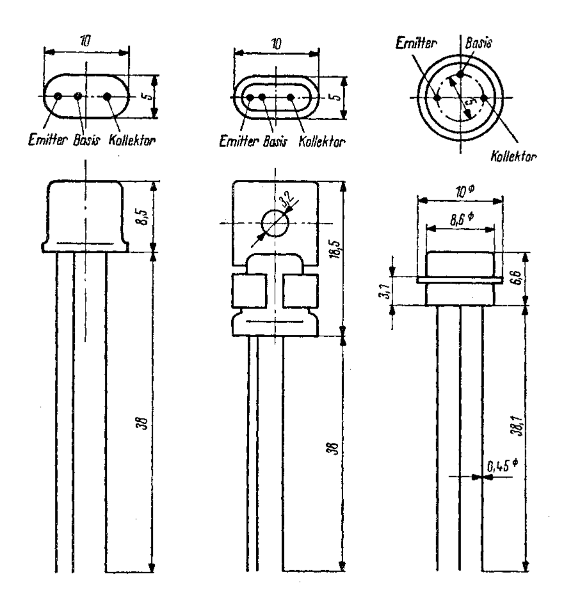
Type	Stromverstärkung		Kollektor-spannung $-U_{CEmax}$ (V)	Kollektor-strom $-I_{Cmax}$ (mA)	Verlust-leistung P_{Vmax} (mW)	Grenzfrequenz		Rausch-faktor F (dB)	Verwendungszweck
	α	β				f_α (MHz)	f_β (MHz)		
OC 815	10/20		15	50	50	> 0,3		< 25	NF-Endstufen kleiner Leistung
816	20/100		15	50	50	> 0,3		< 25	NF-Endstufen kleiner Leistung
817	> 20		15	50	50	> 0,3		< 10	Rauscharme NF-Stufen
818	> 20		15	50	50	> 0,3		< 5	Rauscharme NF-Stufen
820	> 20		20	135	100	> 0,3		< 25	NF-Endstufen mittl. Leistung
821	> 20		20	135	100	> 0,3		< 25	NF-Endstufen mittl. Leistung
824	10/20		20	135	120	> 0,3		< 25	NF-Endstufen mittl. Leistung
825	> 20		20	135	120	> 0,3		< 25	NF-Endstufen mittl. Leistung
826	> 20		20	135	120	> 0,3		< 10	Rauscharme NF-Vorstufen
827	> 20		20	135	120	> 0,3		< 5	Rauscharme NF-Vorstufen
Germanium-Leistungstransistoren									
OC 830	> 10		20	1000	1000				NF-Leistungsendstufen
831	> 20		20	1000	1000				NF-Leistungsendstufen
835		> 10	20	3000	4000				NF-Leistungsendstufen
836		> 20	20	3000	4000				NF-Leistungsendstufen
Germanium-HF-Transistoren									
OC 870		> 20	15	20	30	> 1			NF-Vorstufen
871		> 20	15	20	30	> 3			ZF-Stufen 450 kHz
872		> 20	15	20	30	> 7			Mischstufen 2 MHz
880					50	> 10			Mischstufen 2 MHz
881					50		> 20		Vor- und Mischstufen im KW-Bereich
882					50		> 30		ZF-Stufen 10,7 MHz
883					50		> 60		Mischstufen bis 100 MHz

Bemerkungen: Sperrschichttemperatur T_{max}: für alle Typen 75 °C
Stromverstärkung α = Stromverstärkungsfaktor in Basis-Schaltung
Stromverstärkung β = Stromverstärkungsfaktor in Emitter-Schaltung
Grenzfrequenz f_α = Verstärkungsfrequenz in Basis-Schaltung
Grenzfrequenz f_β = Verstärkungsfrequenz in Emitter-Schaltung

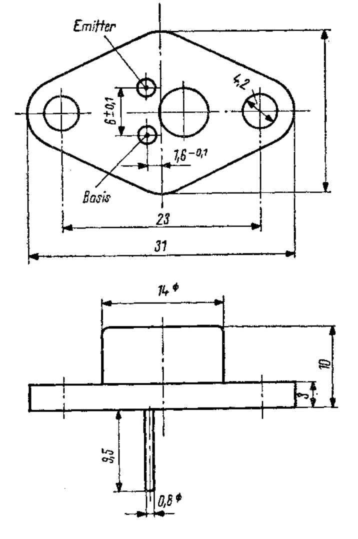
Germanium-Flächentransistoren

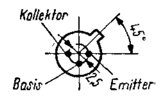
Die Transistoren dieser Typenreihe eignen sich speziell für Lehr- und Amateurzwecke, können aber jederzeit auch in anspruchsvolleren Schaltungen eingesetzt werden. **Zu Sonderpreisen in Fachgeschäften erhältlich.**

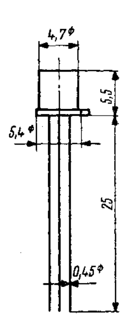
Type	Strom-verstärkung	Kollektor-spannung (V)	Kollektor-strom (mA)	Verlust-leistung (mW)	Grenz-frequenz (MHz)	Anwendung
LA 25	10—80	10	15	25	> 0,2	NF-Transistor f. Vorstufen
50	10—80	10	50	50—100	> 0,2	NF-Transistor
100	10—80		150	120—150	> 0,2	NF-Transistor
1			1000	1000		NF-Leistungstransistor
4			3000	4000		NF-Leistungstransistor
30	20—100		15	30	> 0,3	HF-Transistor




Kollektoranschluß am Gehäuse







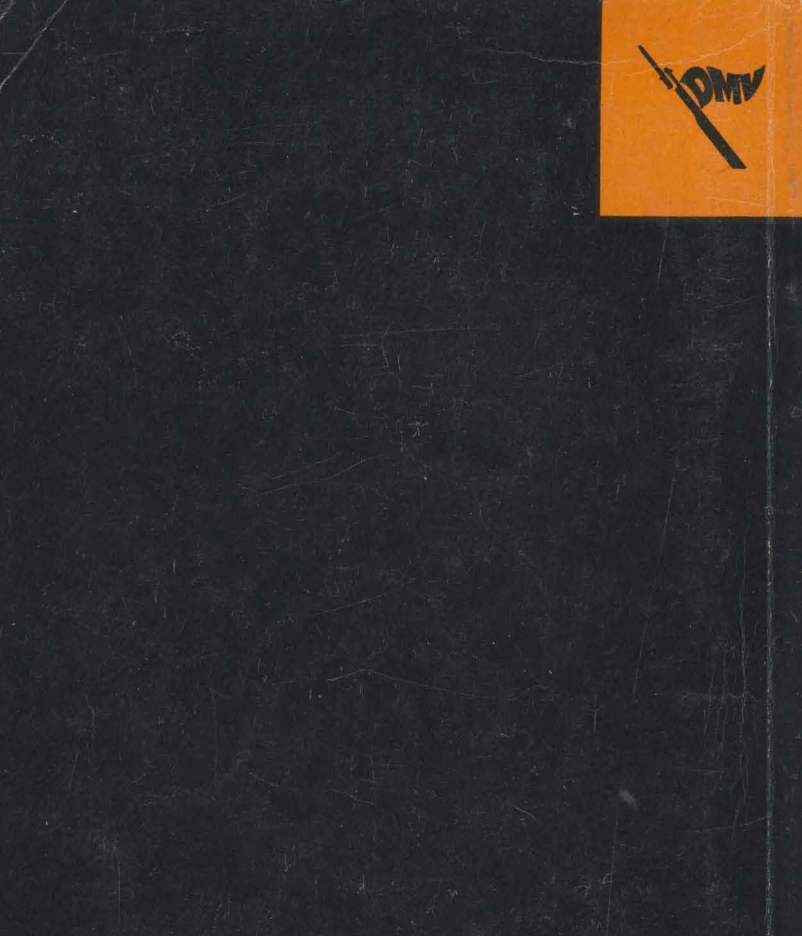
LITERATURHINWEISE

Autorenkollektiv:	Amateurfunk, Deutscher Militärverlag, Berlin 1963
Fischer, H.-J.:	Transistortechnik für den Kurzwellenamateur, Verlag Sport und Technik, Berlin 1962
Fritzsche, C.:	Herstellung von Halbleitern, Berlin 1962
Grauhering, K.:	Halbleiterbauelemente, Verlag Technik, Berlin 1960
Otto, K./Müller, H.:	Flächentransistoren, Fachbuchverlag, Leipzig 1960
Pabst, B.:	Bauelemente der Rundfunktechnik, Teubner-Verlag, Leipzig 1960
Pabst, B.:	Fehlersuche für Rundfunkmechaniker, Leipzig 1961
Pitsch, H.:	Hilfsbuch für die Funktechnik, Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1957
Pfüller, S.:	Halbleiter – Bauelemente neuer Technik, Leipzig 1961

Broschürenreihe „Der praktische Funkamateur", Deutscher Militärverlag, Berlin

Fischer/Blos:	Transistortaschenempfänger selbstgebaut, Bd. 17
Fischer, H.-J.:	Einführung in die Dioden- und Transistortechnik, Bd. 34
Jakubaschk, H.:	Transistorschaltungen I, Bd. 20
Kronjäger, O.:	Formelsammlung für den Funkamateur I, Bd. 21
Morgenroth, O.:	Vom Schaltzeichen zum Empfängerschaltbild, Bd. 10
Morgenroth, O.:	Funktechnische Bauelemente I, Bd. 23
Zeitschriften:	„funkamateur", Berlin-Treptow „radio und fernsehen", Berlin

1.–20. Tausend
Deutscher Militärverlag, Berlin 1963
Lizenznummer 5
Zeichnungen: Hildegard Seidler
Lektor: Christa Fischer
Korrektor: Walter Boelicke
Hersteller: Jürgen Hecht
Gesamtherstellung: (204) VEB Graphische Werkstätten Berlin, Werk I, 20 4112
Preis: 1,90 DM



DEUTSCHER MILITÄRVERLAG